

1445

Самонян Д. Я.

1952
Декабрь 1952

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
УНИВЕРСИТЕТ им. А. А. ЖДАНОВА

548.0:549

В. Б. ТАТАРСКИЙ

КРИСТАЛЛООПТИКА
И ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЕЩЕСТВА

~~9288~~
1415

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ОРДЕНА ЛЕНИНА УНИВЕРСИТЕТА
им. А. А. ЖДАНОВА
ЛЕНИНГРАД
1949



ПРЕДИСЛОВИЕ

Кристаллооптический метод анализа вещества развивался главным образом применительно к петрографии. Поэтому объем сведений, которые даются в руководствах по прикладной кристаллооптике, рассчитан на исследование минералов в петрографических шлифах.

За последние 20—25 лет получил широкое распространение иммерсионный метод. Он применяется при изучении осадочных пород рыхлых и плотных, аксессуарных минералов изверженных пород, отдельных минералов и минеральных ассоциаций, шлихов, продуктов обогащения руд, солевых залежей и солевых отложений морей и озер, почв и солевых отложений в почвах, при исследовании различных продуктов химической технологии, при фазовом анализе равновесных систем и пр. Таков примерный перечень областей, в которые кристаллооптический метод анализа проник в форме иммерсионного метода. Однако до сих пор отсутствуют руководства, которые бы отражали специфику иммерсионного метода, давали необходимый объем теоретических сведений и указывали на отличия в проявлении оптических свойств кристаллов в иммерсионных препаратах по сравнению с петрографическими шлифами.

Специальные исследования и руководства, посвященные иммерсионному методу, трактуют лишь вопрос о точном измерении показателей преломления кристаллов. Имеются также работы, посвященные количественному подсчету в иммерсии содержания различных компонентов в смеси. Но наиболее трудная задача иммерсионного метода — определение вещества по совокупности всех оптических свойств его кристаллов — в существующих руководствах совершенно не затрагивается. Это обстоятельство является одним из главных препятствий к широкому распространению иммерсионного метода и к использованию всех его возможностей там, где он применяется.

Первая часть предлагаемого руководства соответствует читаемому автором курсу кристаллооптики, имеющему целью подготовить слушателей к прохождению курсов породообразующих минералов и иммерсионного метода. Соответственно с этим теория дается в объеме, необходимом для того, чтобы самостоятельно разбираться в наблюдаемых явлениях. Методы определения оптических свойств кристаллов излагаются применительно как к шлифам, так и к иммерсионным препаратам. Попутно даются практические указания, полезные начинающему работнику, но обычно отсутствующие в руководствах.

Раздел коноскопии излагается значительно полнее, чем в других руководствах, так как исследование минералов в иммерсии по методу, изложенному во второй части книги, требует хорошего знания коноскопии. При составлении этого раздела использованы результаты исследований автора и соответствующие работы.

Вторая часть книги соответствует читаемому автором курсу иммерсионного метода, который рассматривается не узко, как метод измерения показателей преломления, а как самостоятельный метод кристаллооптического анализа, имеющий своей задачей определение природных и искусственных кристаллических продуктов. Большое внимание уделяется приемам и технике работы, получившим своё оформление в кристаллооптической школе Ленинградского Университета, возглавляемой проф. О. М. Аншелесом. Значительная часть материала этого раздела книги является отражением собственного опыта автора.

Систематически излагается разработанный автором метод определения характера спайности, осности и сингонии кристаллов и ориентировки индикатрисы, основанный на наблюдении в иммерсии формы спайных обломков и соответствующих им коноскопических фигур. В заключение дается примерный ход определения вещества по совокупности полученных данных. Являясь первым опытом в этом отношении, данное руководство, естественно, не может претендовать на полноту и совершенство.

Автор считает приятным долгом выразить глубокую благодарность своему учителю проф. О. М. Аншелесу, взявшему на себя труд редактирования данной книги, и товарищам по работе П. В. Грушвицкому, В. А. Франк-Каменецкому и Г. М. Попову, которые просмотрели эту книгу в рукописи и дали ряд ценных замечаний.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КРИСТАЛЛООПТИКИ. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Природа света

Согласно волновой теории видимый нами свет представляет собой поперечное гармоническое колебательное движение, распространяющееся от источника света во все стороны с очень большой скоростью. Впервые волновая теория света была предложена Гюйгенсом (1690), считавшим, что световая энергия переносится при посредстве гипотетического мирового эфира. Свет рассматривался Гюйгенсом как продольное колебательное движение частиц эфира. Исследования начала XIX века показали, что многие явления, наблюдаемые главным образом при прохождении света через кристаллы, не могут быть объяснены этой теорией. Основываясь на этих явлениях Френель (1819) показал, что свет представляет собой не продольное, а поперечное колебательное движение. Построения Френеля легли в основу кристаллооптики. Они не только объяснили все известные в то время оптические свойства кристаллов, но и позволили предсказать и открыть некоторые новые свойства (коническая рефракция). Однако Френель, так же как и Гюйгенс, считал, что световые колебания представляют собой движение самих частиц эфира. Во второй половине XIX века трудами главным образом Максвелла была создана электромагнитная теория света, объясняющая световые явления как следствие возбуждения в эфире электромагнитных колебаний, а не механического движения частиц эфира. Открытые вскоре (1888) радиоволны, а затем лучи Рентгена (1895) оказались той же электромагнитной природы и отличаются от световых лучей лишь длиной волны. Таким образом свет оказывается лишь частным случаем лучистой энергии.¹ Решающее подтверждение электромагнитная теория получила в замечательных опытах П. Н. Лебедева. Лебедевым, в частности, было впервые получено электро-

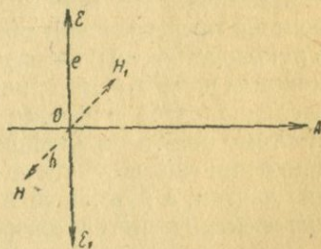


Рис. 1. Схема электромагнитных колебаний.

¹ О различных свойствах света и о роли его во вселенной в популярной форме рассказывается в книге В. Брэгга «Мир света», ОНТИ, 1935.

магнитное излучение с длиной волны около 6 мм, заполнившее пробел между инфракрасными лучами и более длинными радиоволнами.

Упрощенная схема электромагнитных колебаний такова. В каждой точке луча, распространяющегося по направлению OA (рис. 1), под влиянием источника света происходит периодическое изменение напряжений электрического и магнитного полей. Если каждое из этих напряжений мы изобразим вектором, то в любой точке O луча электрический вектор e с течением времени быстро возрастает до определенной величины (например OE), затем уменьшается до нуля и снова возрастает, но в противоположную сторону до $OE_1 = OE$. Подобным же образом ведет себя магнитный вектор h , причем оба эти вектора в изотропной среде остаются все время перпендикулярными к лучу и друг к другу.

Из этой схемы видно, что устаревшая теория механических колебаний эфира была справедлива в том отношении, что свет есть п о п е р е ч н о е гармоническое колебательное движение. Поэтому недостаточно совершенная эфирно-волновая теория позволила науке притти к целому ряду достижений, которые сохраняют свою силу и с точки зрения электромагнитной теории, давшей возможность неизмеримо глубже заглянуть в природу световых явлений.

К числу таких достижений относится изучение оптических свойств кристаллов. Все кристаллооптические методы были получены при помощи представлений эфирно-волновой теории света. В связи с этим в руководствах по прикладной кристаллооптике оказывается вполне возможным излагать материал, пользуясь наглядными и привычными для неспециалистов в физике представлениями эфирно-волновой теории. Поэтому и мы в дальнейшем будем иногда говорить о колебательном движении частиц, хотя в действительности имеет место не перемещение частиц, а изменение в величине векторов, выражающих напряженности электрического и магнитного полей в каждой точке светового луча.

§ 2. П е р е ч н о е гармоническое колебательное движение

Имеем ряд точек $0, 1, 2, 3...$ (рис. 2, 0), связанных между собой упругими силами и находящихся в состоянии покоя. Допустим, что точка 0 получила толчок в направлении, перпендикулярном к направлению ряда. Силы, связывающие эту точку с остальными, помешают ей уйти под влиянием толчка в бесконечность, и она, отклонившись от положения равновесия на некоторое расстояние A , начнет возвращаться обратно. Движение точки 0 заставит выйти из состояния покоя связанные с ней точки $1, 2, 3...$ Каждая из этих точек начнет движение с некоторым запозданием относительно предыдущей. На рис. 2, $T/4$ показано положение точек в тот момент, когда точка 0 дойдет до своего крайнего положения вверх. Точка 4 еще находится в покое. За то время, пока точка 0 возвращается к своему начальному положению, точки $1, 2, 3$ дойдут до крайнего верхнего положения (на расстоянии A от нулевого положения) и начнут двигаться вниз. В тот момент, когда точка 0 окажется в нулевом положении, точка 4 перейдет в крайнее верхнее положение, в свою очередь вовлекая

в движение расположенные дальше точки 5, 6, 7, 8. Рис. 2, $T/2$ показывает положение точек в этот момент.

Точка O , дойдя до своего первоначального места, не остановится, а по инерции будет двигаться дальше, пока не окажется ниже нулевого положения, на расстоянии A (предполагается, что силы трения отсутствуют). Этот момент показан на рис. 2, $3/4T$. Еще через некоторое время точка O снова окажется на нулевой линии (рис. 2, T), завершая этим цикл своего движения. Затем она снова пойдет вверх и т. д. Тем временем колебательное движение все дальше распространяется по нашей прямой.

Некоторые элементы гармонического колебательного движения. Амплитуда (A) — наибольшее расстояние, на которое отклон-

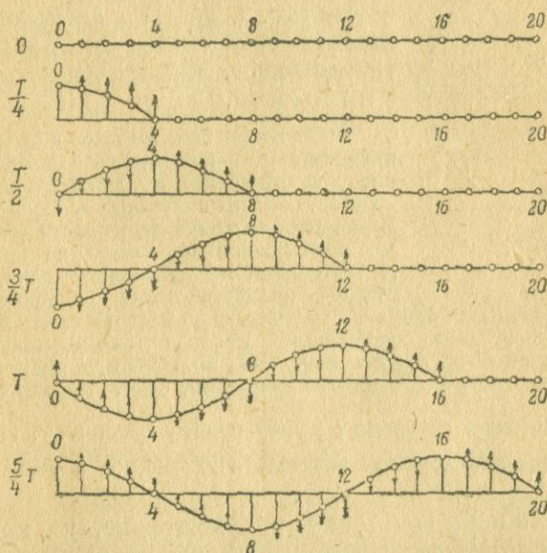


Рис. 2. Распространение поперечного гармонического колебательного движения вдоль прямой.

няется колеблющаяся точка от своего положения равновесия. Энергия колебательного движения (I) пропорциональна квадрату амплитуды.

Период колебания (T) — промежуток времени, в течение которого точка совершает одно полное колебание, т. е. отклоняется до крайнего положения, возвращается назад, отклоняется до второго крайнего положения и снова возвращается в первоначальное положение. Период, следовательно, есть промежуток времени, в течение которого частица совершает путь, равный $4A$.

Частота колебания (ν) — число полных колебаний в секунду. Частота связана простым отношением с периодом. Период

есть та часть секунды, в течение которой совершается одно колебание.

Следовательно, $T = \frac{1}{\nu}$, или $\nu = \frac{1}{T}$.

Фаза (φ) — состояние колебания в данной точке луча в данный момент. В дальнейшем мы будем говорить о фазах одинаковых, противоположных и неравных.

Колеблющиеся точки данного луча находятся в одинаковых фазах, если расположены по одну сторону от положения равновесия, на равных расстояниях от него и движутся в одну сторону.

Колеблющиеся точки данного луча находятся в противоположных фазах, если расположены по разным сторонам от положения равновесия, на равных расстояниях от него и движутся в противоположные стороны.

На рис. 2, $5/4 T$ в одинаковых фазах находятся точки 0 и 16; 2 и 18; 4 и 20. В противоположных фазах находятся точки 0 и 8; 4 и 12; 2 и 10.

Фаза может быть выражена количественно, если представлять гармоническое колебательное движение как проекцию на диаметр равномерного движения точки по окружности. Если точка N равномерно движется по окружности (рис. 3), то точка K , являющаяся проекцией на диаметр BD точки N , совершает колебательное движение. Время, в течение которого точка N обойдет всю окружность, есть период колебания T , так как за это время точка K совершит одно полное колебание. Фаза колебания в каждый данный момент определяется положением точки N на окружности. Фаза колебания, по истечении некоторого промежутка времени t после начала движения, будет выражаться той частью

окружности, которую за время t успеет пройти точка N ; т. е. $\varphi = \frac{2\pi t}{T}$. Если считать, что движение точки N началось в A (рис. 3) и совершается по часовой стрелке, то $\varphi = \angle AON$.

Длина волны (λ) есть то расстояние, на которое распространяется колебательное движение за один период (см. рис. 2, T) или, иначе, длина волны есть расстояние между ближайшими точками, находящимися в одинаковых фазах (например, между точками 0 и 16 или 4 и 20 на рис. 2, $5/4 T$).

Если обозначим v — скорость распространения колебательного движения, то $\lambda = vT$. Выразив T через $\frac{1}{\nu}$, имеем $\lambda = \frac{v}{\nu}$, откуда $v = \lambda\nu$.

§ 3. Свет как гармоническое колебательное движение

Скорость распространения электромагнитных колебаний в пустоте $v = 299\,796 \pm 4$ км/сек. В дальнейшем будем приближенно считать $v \approx 300\,000$ км/сек. К области видимого света относятся электромагнитные колебания с длинами волн приблизительно от 380 м μ до 780 м μ . Ниже 380 м μ идут невидимые ультрафиолетовые лучи, переходящие

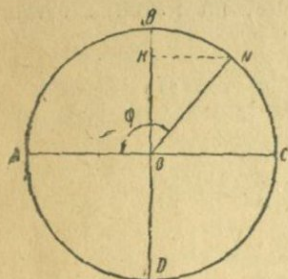


Рис. 3.

при значительно меньшей λ в рентгеновские. Выше 780 μ — область невидимых инфракрасных лучей, а затем — электромагнитных волн, используемых для радиосвязи.

Белый свет практически представляет собой смесь световых колебаний всех возможных длин волн (380—780 μ). Если по какой-либо причине часть длин волн, входящих в состав белого света, будет усилена или, наоборот, ослаблена, свет будет казаться не белым, а цветным. Такой цветной свет, так же как и белый, является сложным, состоящим из света различных длин волн.

Свет какой-либо одной длины волны называется простым или монохроматическим. Каждому монохроматическому излучению соответствует свой определенный цвет. Приводим табличку цветов, соответствующих некоторым длинам волн.

Источник излучения	λ (в μ)	Цвет
H	397	фиолетовый
H	434	синий
In	451	синий
Tl	535	зеленый
Hg	546	зеленый
Na	589	желтый
Li	671	красный
K	767	красный
K	770	красный

Сила или интенсивность света определяется энергией светового колебания и пропорциональна квадрату амплитуды.

Частота и период световых колебаний. Из выражения $v = \lambda \nu$ следует, что ν для света весьма велика. Для $\lambda = 600 \mu$

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{6 \cdot 10^{-4}} = 0,5 \cdot 10^{14}.$$

Период колебания как величина обратная частоте чрезвычайно мал. Для той же длины волны $T = \frac{1}{\lambda} = 2 \cdot 10^{-14}$ секунды.

λ и ν при разных скоростях света. Скорость света только в пустоте равна 300 000 км/сек, во всех других средах она меньше. Пусть монохроматическое излучение с длиной волны λ и соответствующей ей частотой ν переходит из пустоты (скорость света $= v$) в некоторую среду (скорость света $= v_1$). Левая часть выражения $v = \lambda \nu$ при этом уменьшается; соответственно должна уменьшиться и правая часть. Это уменьшение, как оказывается, происходит исключительно за счет изменения длины волны, частота же остается постоянной, т. е. $v_1 = \lambda_1 \nu$. Из отношения этих двух выражений находим новую длину волны $\lambda_1 = \lambda \frac{v_1}{v}$.

Отношение $\frac{v}{v_1} = n$ есть показатель преломления среды, скорость света в которой $= v_1$ (подробнее об этом ниже). Отсюда $\lambda_1 = \frac{\lambda}{n}$, т. е. длина световой волны в среде равна длине

волны того же излучения в пустоте, деленной на показатель преломления данной среды.

Во всех случаях, когда указывается длина световой волны, соответствующая тому или иному цвету, подразумевается длина волны в пустоте.

§ 4. Поверхность волны. Принцип Гюйгенса

В § 2 мы рассмотрели распространение световых колебаний вдоль одного направления (луча). Свет от своего источника распространяется

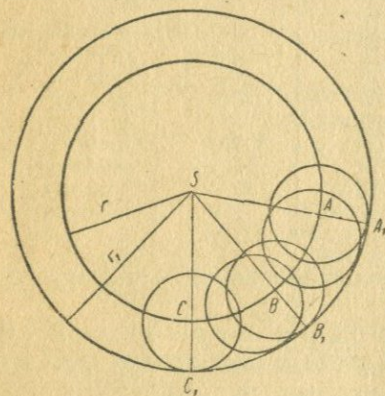


Рис. 4.

во все стороны, следовательно каждая прямая, проходящая через источник света, является таким лучом. В изотропных средах (пустота, воздух, вода, стекло и пр.) свет распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. Пути, пройденные светом по всем направлениям от светящейся точки за одно и то же время, равны между собой. Соединив концы всех этих путей, получим поверхность, имеющую форму шара. Поверхность, до всех точек которой свет из данного источника доходит одновременно, называется поверхностью волны

или волновой поверхностью.

Во всех точках волновой поверхности фазы колебаний равны между собой.

Волновая теория на первый взгляд противоречит общеизвестному факту прямолинейного распространения света. Дело в том, что каждая точка, до которой дошло колебательное движение, в свою очередь должна рассматриваться как новый центр колебаний, распространяющихся от этой точки во все стороны. Это противоречие устраняется принципом Гюйгенса.

Пусть в некоторый данный момент сферическая волна имеет радиус r и занимает положение ABC (рис. 4). Какое положение займет она через промежуток времени t ? Каждая колеблющаяся частица среды является новым источником колебаний, распространяющим свои волны по всем направлениям. Вокруг каждой точки нашей сферы описываем новую, так называемую элементарную сферу радиусом $AA_1 = vt$, где v — скорость света. Полученный таким бесконечный ряд элементарных сфер будет иметь общую огибающую поверхность $A_1B_1C_1$, являющуюся новой поверхностью волны с радиусом $r_1 = r + vt$. Математический анализ показывает, что во всех местах, лежащих на сфере $A_1B_1C_1$, действие элементарных волн взаимно уни-

чтожается. Из точки A свет попадает только в точку A_1 , в которой огибающая сфера $A_1B_1C_1$ касается элементарной сферы, описанной вокруг A , из точки B свет попадает в точку B_1 и так далее. Продолжением луча SA будет отрезок AA_1 , луча SB — отрезок BB_1 , луча SC — отрезок CC_1 и т. д.

Изложенное и составляет содержание принципа Гюйгенса. Основываясь на нем, можно находить новые положения волн и лучей. Вышеприведенное построение показывает, что в однородной изотропной среде лучи прямолинейны и перпендикулярны к поверхности волны.

§ 5. Показатель преломления

При переходе света из одной среды в другую происходит, как известно, преломление лучей. Принцип Гюйгенса позволяет объяснить это явление и построить направление преломленных лучей. Для простоты рассмотрим случай, когда поверхность раздела двух сред плоская и падающая волна также плоская.¹

Пусть плоская волна AB падает под некоторым углом на плоскость PP_1 , представляющую собой границу между средами I и II (рис. 5). Обозначим скорость света в среде I — v_1 , в среде II — v_2 . Падающая волна последовательно приводит в колебательное движение точки плоскости PP_1 , начиная от A и кончая C . По принципу Гюйгенса все эти точки рассматриваются как центры колебаний, испускающие элементарные сферические волны как в среду I , так и в среду II . Элементарные волны в первой среде дадут отраженную волну, которая нас сейчас не интересует. Рассмотрим, что произойдет во второй среде.

Луч S коснется поверхности раздела в точке A в тот момент, когда лучу S_1 остается еще пройти в среде I путь BC . Обозначим через

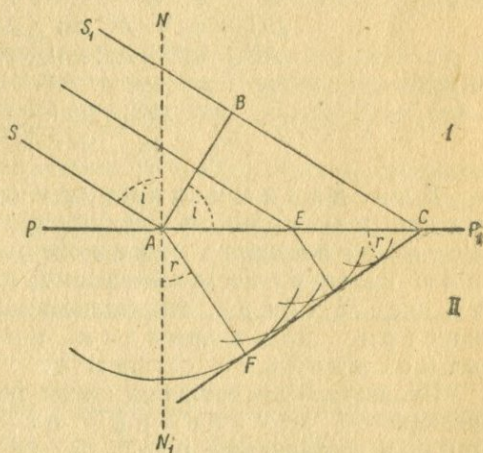


Рис. 5. Построение преломленных волн и лучей согласно принципу Гюйгенса.

¹ Лучи, падающие из бесконечно удаленного источника света на площадку конечных размеров, параллельны друг другу. Соответствующий им участок световой волны является плоскостью. Практически можно считать лучи параллельными друг другу, а волну плоскою в тех случаях, когда освещаемый участок мал по сравнению с расстоянием до источника света. Кроме того, плоскую волну можно получить при посредстве линзы (коллиматора), превращающей расходящийся пучок лучей в параллельный.

t промежутков времени, в течение которого луч S_1 пройдет этот путь $BC = v_1 t$. За это время из точки A успеет распространиться во вторую среду сферическая волна с радиусом $v_2 t$; из точки E , лежащей на середине AC , волна распространится на радиус вдвое меньший и т. д. Получается множество сфер разных радиусов (от $v_2 t$ в точке A до нуля в точке C). К этим сферам можно провести общую касательную плоскость CF , которая и будет поверхностью преломленной волны. Она перпендикулярна к плоскости чертежа и не параллельна падающей волне AB .

Обозначим угол между падающим лучом и перпендикуляром к плоскости раздела через i (у г о л п а д е н и я), а угол между лучом преломленным и тем же перпендикуляром — через r (у г о л п р е л о м л е н и я)

$$i = \angle SAN = \angle BAC \text{ (так как } AB \perp AS; AC \perp AN);$$

$$r = \angle FAN_1 = \angle ACF \text{ (так как } AC \perp AN_1; CF \perp AF);$$

$$BC = v_1 t = AC \sin \angle BAC = AC \sin i;$$

$$AF = v_2 t = AC \sin \angle ACF = AC \sin r,$$

откуда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin r} = n_{(I, II)}.$$

Для данных двух сред отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная отношению скорости света в I среде к скорости света во II среде. Это отношение обозначается $n_{(I, II)}$ и называется показателем преломления среды II относительно среды I .

Показатель преломления какой-либо среды относительно пустоты называется абсолютным показателем преломления и обозначается n .

Так как скорость света в пустоте наибольшая, показатель преломления $n = \frac{v_{\text{пустоты}}}{v_{\text{среды}}}$ всегда больше единицы.¹ На практике показатель преломления определяется не относительно пустоты, а относительно воздуха, скорость света в котором мало отличается от скорости света в пустоте ($n_{\text{воздуха}} = \frac{v_{\text{пустоты}}}{v_{\text{воздуха}}} = 1,0003$).

При дальнейшем изложении мы не будем делать различия между показателем преломления среды относительно воздуха и относительно пустоты.

¹ Для непрозрачных (поглощающих свет) тел показатель преломления может быть и меньше единицы (например, для меди $n = 0,65$, для золота — $0,58$, для серебра — $0,27$). Однако физическое значение показателя преломления для таких тел несколько иное, и скорость светового луча в них отнюдь не больше, чем в пустоте.

Легко вывести зависимость между абсолютным показателем преломления и показателем преломления относительно данной среды.

Возьмем две какие-либо среды *I* и *II*. Обозначим через v_0 скорость света в пустоте, v_1 — скорость света в *I* среде, v_2 — скорость света во *II* среде. Абсолютные показатели преломления этих сред:

$$n_1 = \frac{v_0}{v_1}; \quad n_2 = \frac{v_0}{v_2}.$$

Разделим второе равенство на первое: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$. Правая часть этого отношения есть $n_{(I, II)}$ — показатель преломления среды *II* относительно среды *I*. Таким образом, $n_{(I, II)} = \frac{n_2}{n_1}$, т. е. показатель преломления среды *II* относительно среды *I* равен отношению абсолютного показателя среды *II* к абсолютному показателю среды *I*.

В дальнейшем, изучая явления, происходящие на границах двух сред, вместо относительного показателя преломления мы будем пользоваться отношением абсолютных показателей преломления этих сред.

Дисперсия показателей преломления. Только в пустоте скорость распространения одинакова для света всех волн. В средах же скорости, а, следовательно, и показатели преломления света различны для разных длин волн. В качестве примера приведем показатели преломления некоторых веществ для разных частей спектра.

Вещества	Линии спектра ¹						
	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>
Вода при 18,7° С	1,3309	1,3317	1,3336	1,3359	1,3378	1,3413	1,3442
Сероуглерод (24,2° С)	1,6114	1,6147	1,6240	1,6368	1,6487	1,6728	1,6956
Стекло (кронглас № 13)	1,5243	1,5253	1,5280	1,5314	1,5343	1,5399	1,5447
Каменная соль (NaCl)	1,5394	1,5407	1,5443	—	1,5534	1,5616	1,5690

Различие в показателях преломления вещества для различных длин волн называется дисперсией показателей преломления. Из приведенной таблички видно, что эта дисперсия может достигать весьма заметной величины, поэтому при точном определении показателей преломления необходимо указывать, для какой части спектра они измерены.

¹ Линия *B* лежит в красной части спектра ($\lambda_B = 687 \text{ м}\mu$); *C* — между красной и оранжевой ($\lambda_C = 656 \text{ м}\mu$); *D* — между оранжевой и желтой ($\lambda_D = 589 \text{ м}\mu$); *E* — в зеленой ($\lambda_E = 527 \text{ м}\mu$); *F* — между зеленой и синей ($\lambda_F = 486 \text{ м}\mu$); *G* — между темносиней и фиолетовой ($\lambda_G = 431 \text{ м}\mu$); *H* — двойная линия на конце фиолетовой части спектра ($\lambda_H = 397 \text{ м}\mu$).

В нашей табличке показатели преломления всех веществ возрастают с уменьшением длины волны света. Такая дисперсия носит название *нормальной*.

Аномальная дисперсия, т. е. уменьшение показателя преломления параллельно с уменьшением длины световой волны, наблюдается в средах, непрозрачных для некоторых длин волн, вблизи области поглощения (т. е. вблизи той части спектра, для которой они непрозрачны). Поскольку мы изучаем оптические свойства прозрачных тел, нам придется встречаться только с нормальной дисперсией.

§ 6. Частные случаи преломления. Полное внутреннее отражение

Из построения (§ 5) и определения показателя преломления следует, что свет, идущий перпендикулярно к поверхности раздела двух изотропных сред, не испытывает преломления.

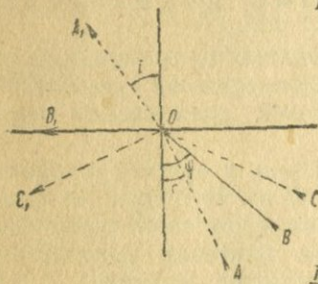


Рис. 6. Полное внутреннее отражение: $n_{II} > n_I$; луч AO после преломления идет по направлению OA_1 ; луч BO падает под предельным углом φ и, преломившись, скользит по поверхности (луч OB_1); луч CO , падая под углом $> \varphi$, испытывает полное внутреннее отражение и идет по направлению OC_1 .

При переходе света из среды с меньшим показателем преломления в среду с большим показателем преломления угол преломления меньше угла падения, и наоборот, при переходе света из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления угол преломления больше угла падения.

При переходе света из пустоты (или воздуха) в среду, имеющую показатель преломления $= n$, всем возможным углам падения от 0 до 90° соответствуют углы преломления от 0 до некоторого угла φ . Угол φ соответствует углу падения, равному 90° . Величина угла φ находится из формулы $n = \frac{\sin i}{\sin r}$, если r приравняем φ , а вместо i поставим 90° :

$$n = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \varphi}, \text{ откуда } \sin \varphi = \frac{1}{n}.$$

Угол φ называется *предельным*.

При обратном ходе лучей — из рассматриваемой среды в пустоту — углам r от 0° до φ соответствуют в пустоте углы i от 0° до 90° . При величине $r > \varphi$ выражение $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ лишается смысла, так как в нем $\sin i$ должен быть > 1 . В этом случае свет вовсе не выходит из среды, а весь целиком отражается от ее поверхности и идет по направлению OC_1 (рис. 6).

Это явление называется *полным внутренним отражением*.

При переходе света из среды II не в пустоту, а в некоторую среду I, полное внутреннее отражение может иметь место, если $n_{II} > n_I$. Предельный угол в этом случае находится из выражения

$$\sin \varphi = \frac{1}{n_{(I, II)}} = \frac{n_I}{n_{II}}.$$

Таким образом полное внутреннее отражение наблюдается, если свет из среды с большим показателем преломления падает на среду с меньшим показателем под углом, превышающим предельный.

Чем больше разница между показателями преломления обеих сред, тем меньшую величину имеет предельный угол и тем большая, следовательно, часть лучей, падающих на границу раздела под разными углами, испытывает полное внутреннее отражение.

На явлении полного внутреннего отражения основан целый ряд оптических приборов, в частности рефрактометры, т. е. приборы для измерения показателей преломления, и призма Николя, об устройстве и назначении которой будет сказано ниже.

Глава I

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ

§ 1. Явления в исландском шпате

В 1669 г. в Копенгаген были привезены из Исландии большие куски прозрачного минерала, получившего название исландский шпат.¹ Датский ученый Э. Бартолин обнаружил в этом веществе

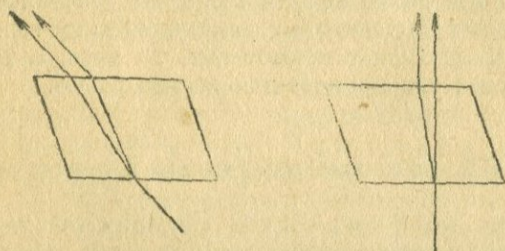


Рис. 7. Схема дупреломления лучей в кристалле исландского шпата.

явление, названное впоследствии двойным лучепреломлением или дупреломлением. Заключается оно в том, что луч света, входя в кристалл и преломляясь, разделяется на два луча, идущие через кристалл под некоторым углом один к другому (угол расхождения лучей в исландском шпате достигает $6\frac{1}{2}^\circ$). Вследствие этого мелкие предметы, рассматриваемые через достаточно толстый кусок исландского шпата, кажутся двойными (рис. 7 и 8).

¹ Исландским шпатам называются крупные прозрачные кристаллы кальцита.

Через 20 лет Гюйгенс в своем знаменитом «Трактате о свете» подтвердил наблюдения Бартолина и показал, что с точки зрения волновой теории почти все они получают объяснение, если допустить, что световая волна в исландском шпате не является простой сферой, как в изотропных телах, а представляет собой двойную поверхность, состоящую из сферы и описанного вокруг нее сплюснутого эллипсоида вращения.

Эта гипотеза Гюйгенса разделила судьбу его теории света. В течение 100 с лишним лет она не имела ни признания, ни дальнейшего развития. Только в самом конце XVIII и начале XIX века

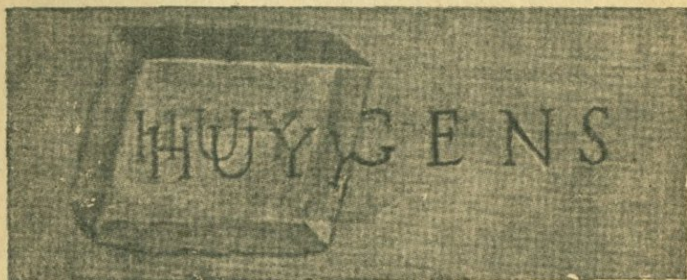


Рис. 8. Раздвоение надписи, рассматриваемой через кристалл исландского шпата.

была создана теория оптических явлений в кристаллах, представляющая в основном развитие идей Гюйгенса. Оказалось, что двупреломлением обладает большинство кристаллических тел, и исландский шпат, если и представляет исключение, то лишь в том отношении, что в нем это свойство проявляется весьма резко.

§ 2. Волновые поверхности в кристаллах

1. Кристаллы кубической сингонии (не имеющие единичных направлений) в оптическом отношении ведут себя как изотропные тела. Свет распространяется в них во все стороны с одинаковой скоростью, и волновая поверхность имеет форму шара. В курсах кристаллооптики кристаллы кубической сингонии часто называются изотропными. Следует помнить, что здесь имеется в виду изотропность только в отношении оптических свойств.

2. В кристаллах средних сингоний — тригональной, тетрагональной и гексагональной (имеющих одно единичное направление) — волновая поверхность представляет собой комбинацию шара и эллипсоида вращения. Ось вращения этого эллипсоида равна диаметру шара. Здесь возможны два случая; а) Шар вписан в сплюснутый эллипсоид вращения (рис. 9, а). Кристаллы, в которых поверхность волны имеет такую форму, называются опти-

чески-отрицательными. б) Шар описан вокруг вытянутого эллипсоида вращения (рис. 9, б). Соответствующие кристаллы называются оптиически-положительными. В природе известны представители обеих этих групп, в частности, упоминавшийся ранее исландский шпат (кальцит) отрицателен. Наиболее распространенный из положительных минералов — кварц.

Рассматривая волновые поверхности (рис. 9), отметим следующее. В кристалле по каждому направлению идут с различной скоростью два луча — один соответствует волне сферической, другой — эллиптической. Сферическая волна и соответствующие ей лучи называются обыкновенными (обозначаются o или ω). Скорость их во всех направлениях в кристалле одинакова. Эллиптическая волна и

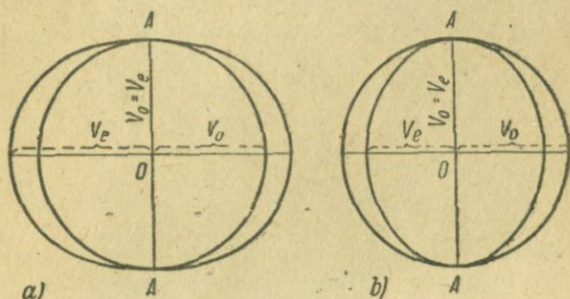


Рис. 9. Волновые поверхности кристаллов средних сингоний: а) — отрицательная, б) — положительная.

соответствующие ей лучи называются необыкновенными (e или ϵ). Скорость распространения их в кристалле различна для разных направлений.

Есть лишь одно направление в кристалле, в котором скорости волн o и e равны между собою. Это направление (OA на рис. 9) называется оптической осью. Луч света, идущий по оптической оси, не разбивается на два луча.

Если свет идет перпендикулярно к оптической оси, различия в скоростях лучей o и e максимальна. Для всех других направлений скорость необыкновенного луча (v_e) имеет величину промежуточную между своим крайним значением и скоростью обыкновенного луча (v_o).

Важно запомнить, что в отрицательных кристаллах $v_o < v_e$, в положительных $v_o > v_e$.

Как будет доказано ниже, оптическая ось в кристаллах средних сингоний всегда совпадает с единичным направлением (главной осью симметрии). Кристаллы средних сингоний, как имеющие одну оптическую ось, в дальнейшем мы будем часто называть оптиически-одноосными или просто одноосными.

3. В кристаллах низших сингоний — ромбической, моноклинной и триклинной (имеющих не меньше

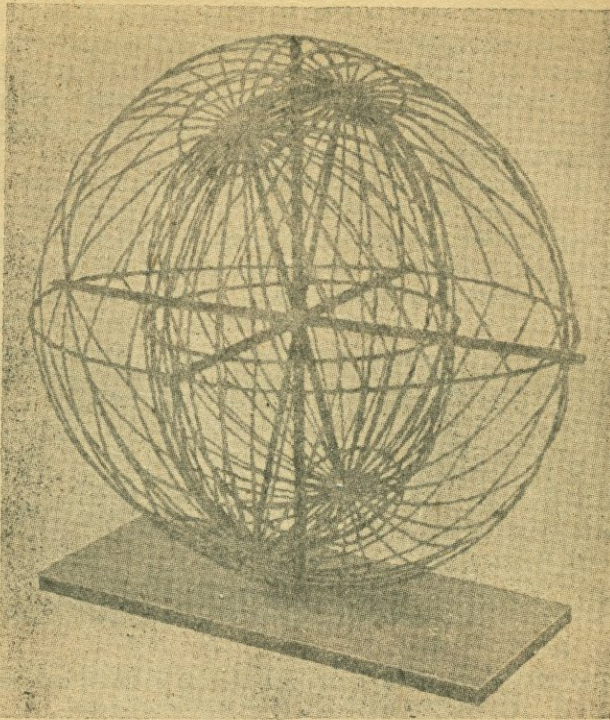


Рис. 10. Модель волновой поверхности кристаллов низших сингоний.

трех единичных направлений) волновая поверхность имеет значительно более сложный вид (рис. 10).

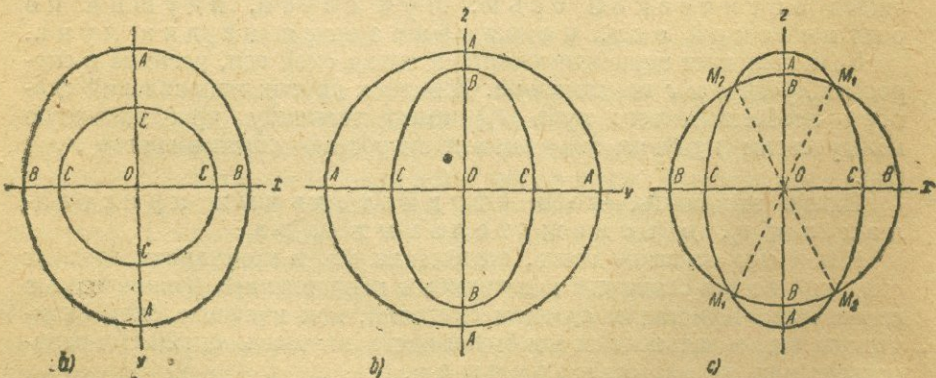


Рис. 11. Сечения волновой поверхности кристаллов низших сингоний по трем ее плоскостям симметрии.

Как и для средних сингоний, она состоит из двух как бы вложенных одна в другую поверхностей и имеет три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии. Сечения ее по этим плоскостям имеют форму кругов и эллипсов (рис. 11). Сечения по другим направлениям являются овалами. Внешняя поверхность в четырех местах имеет воронкообразные углубления. В этих местах она касается внутренней поверхности. Прямая, соединяющая центр волновой поверхности с точкой, где внешняя поверхность соприкасается с внутренней, будет оптической осью, так как по этой прямой оба луча должны распространяться с одинаковой скоростью.¹ Из рис. 10 и 11 видно, что рассматриваемая поверхность имеет две оптические оси (OM_1 и OM_2). Поэтому кристаллы низших сингоний называются оптически-двуосными или просто **двуосными**.

В двуосных кристаллах, в отличие от одноосных, нет волны, имеющей форму шара, т. е. волны обыкновенной. Поэтому оба луча, на которые распадается луч, входящий в двуосный кристалл, являются **необыкновенными**.

§ 3. Преломление света в кристаллах средних сингоний

Для понимания явлений, происходящих при преломлении света кристаллами, достаточно остановиться на примере одноосных кристаллов. В кристаллах двуосных явления принципиально те же, но разбор их затрудняется вследствие большой сложности волновой поверхности. В кристаллах кубической сингонии преломление совершается так же, как в изотропных телах.

Разбор начнем с частных случаев падения света перпендикулярно к поверхности кристалла. В изотропных телах, как известно, при таком направлении лучей не происходит преломления. В кристаллах, как увидим, и в этом случае часто наблюдается преломление и дву-преломление.

1. Свет падает перпендикулярно к поверхности кристалла. Оптическая ось кристалла также перпендикулярна к этой поверхности (рис. 12, *a*). В этом случае плоская волна A_0B_0 , дойдя до кристалла, займет положение AB . Каждая точка поверхности AB может по принципу Гюйгенса рассматриваться, как центр элементарной волны. Та часть элементарной волны, которая распространяется в кристалле, представляет половину волновой поверхности, изображенной на рис. 9. На рис. 12, *a* показаны три элементарных волны из бесконечного их множества. (На этом рисунке, как и на рис. *b* и *c*, показан ход лучей в оптически отрицательном кристалле. Для оптически положительного — построение аналогично.) Общая касательная A_1B_1 к элементарным волнам дает положение волны в кристалле. Видим, что в этом случае преломления не происходит.

¹ Дополнительные сведения об оптических осях кристаллов низших сингоний см. в § 5 этой главы.

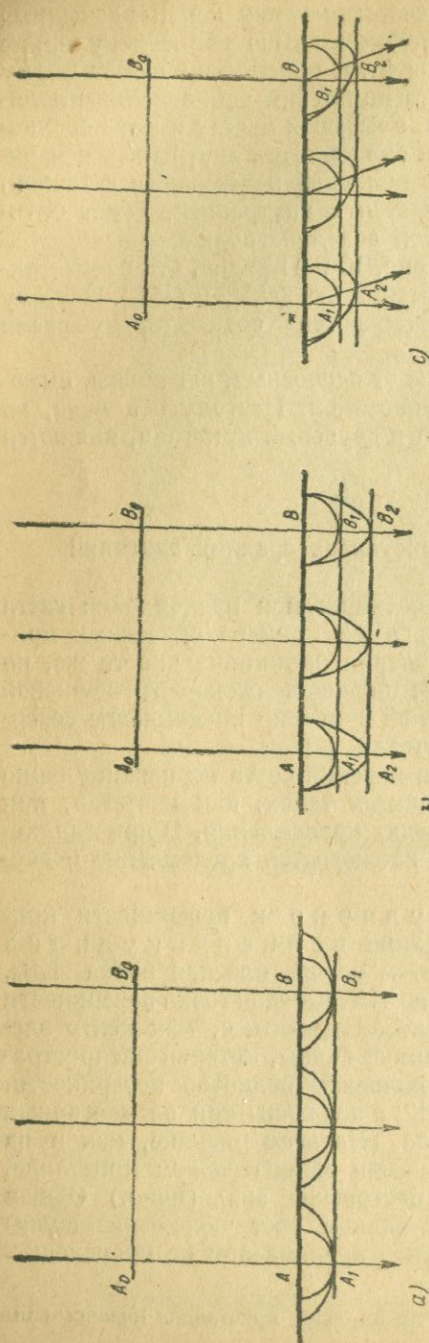


Рис. 12. Двупреломление в одноосном кристалле при вертикальном падении света.

2. Свет падает перпендикулярно к поверхности кристалла. Оптическая ось параллельна этой поверхности (рис. 12, б). Построение аналогично предыдущему, но ориентировка элементарных волн иная. Теперь к ним можно провести две общие касательные A_1B_1 и A_2B_2 . Таким образом, преломления, в собственном смысле слова, и здесь не происходит, но двупреломление, т.е. распадение световой волны на две, имеет место. Волны A_1B_1 и A_2B_2 движутся через кристалл в одном направлении, но с разными скоростями. Ниже будет показано, как обнаружить наличие таких двух волн.

3. Свет падает перпендикулярно к поверхности кристалла. Оптическая ось расположена косо к этой поверхности (рис. 12, с). В этом случае, как и в предыдущем, получаются две волны A_1B_1 и A_2B_2 , идущие по одному и тому же направлению, но с различными скоростями. Однако направление лучей, соответствующих этим двум волнам, будет различно. Обыкновенный луч идет по направлению AA_1 , являющемуся продолжением первоначального направления луча A_0A . Таким образом, обыкновенный луч и в этом случае не преломляется. Необыкновенный же луч преломится и пойдет по направлению AA_2 , делаящему некоторый угол с первоначальным направлением A_0A . (Вспомним, что по принципу Гюйгенса луч есть прямая,

соединяющая центр элементарной волны с точкой, в которой огибающая поверхность — в данном случае плоская волна — касается этой элементарной волны. Поскольку элементарная необыкновенная волна есть эллипсоид, радиус, проведенный к точке касания, в общем случае не перпендикулярен к касательной.) Необыкновенный луч, следовательно, в данном случае не перпендикулярен к своей волне, и направление его не совпадает с направлением движения волны.

Теперь рассмотрим более общие случаи, а именно случаи косоуго падения луча на поверхность кристалла.

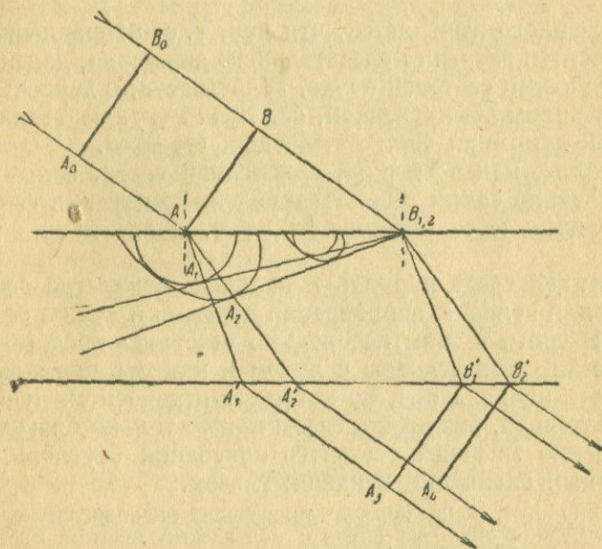


Рис. 13. Прохождение света сквозь плоскопараллельную кристаллическую пластинку. Падающий лучи и оптическая ось кристалла в плоскости чертежа и направлены под углом к поверхности кристалла и друг к другу.

4. Свет падает косо к поверхности кристалла. Оптическая ось также расположена косо, но лежит в плоскости падения¹ (рис. 13). В этом случае, вследствие косоуго падения света, должно иметь место преломление входящих к кристалл волн. Благодаря различной скорости волн o и e (A_1B_1 и A_2B_2) показатели преломления кристалла для этих волн различны, вследствие чего они уже не будут параллельны друг другу. Луч e (AA_2), как и в предыдущем случае, не перпендикулярен к своей волне $A_2B_{1,2}$. Луч o (AA_1) перпендикулярен к волне ($A_1B_{1,2}$). Если кристаллическая пластинка плоскопараллельна, то, преломившись вторично при выходе из нее, волны $A_3B'_1$ и $A_4B'_2$ снова оказываются параллельными друг другу и первоначальному направлению волны

¹ Плоскостью падения называется плоскость, проходящая через падающий луч и перпендикулярная к поверхности, на которую он падает.

A_0B_0 . Оба луча A'_1A_3 и A'_2A_4 также будут параллельны падающему лучу A_0A .

5. В самом общем случае, когда оптическая ось кристалла не лежит в плоскости падения, явление усложняется тем, что луч e в кристалле также выходит из этой плоскости. Однако нормаль к необыкновенной волне всегда остается в плоскости падения.

§ 4. Лучи и нормали

Из изложенного выясняется, что луч, т. е. направление, по которому переносится энергия колебательного движения, далеко не всегда перпендикулярен к световой волне. В частности, в двуосных кристаллах, где нет волны обыкновенной, оба луча могут не совпадать с направлениями движения соответствующих им волн.

В кристалле, как во всякой однородной среде, волны перемещаются параллельно самим себе. Направление движения фронта волны перпендикулярно к ее поверхности, т. е. является нормалью к ней.

В изотропной среде нормаль к волне и луч всегда совпадают. В кристаллах для волны e направления нормали и луча в общем случае различны. В связи с этим необходимо отчетливо представлять себе, какие свойства света связаны с лучом и какие с нормалью.

Луч есть направление, по которому переносится лучистая энергия. Следовательно, видеть предметы можно только благодаря лучам, так как именно энергией светового колебания обусловлено раздражение нервных окончаний в наших глазах.

Что именно луч, а не нормаль производит физиологическое действие на наш глаз, отчетливо видно из опыта с исландским шпатом. Рассматриваемая через спайную выколку этого минерала точка или надпись на листке бумаги кажется удвоенной, даже если смотреть на нее прямо сверху (рис. 7 и 8). Ход световых волн и лучей при этом соответствует рисунку 12, с. Если бы носителями светового ощущения были нормали, надпись не казалась бы удвоенной, так как обе волны идут по одному направлению, и их нормали совпадают. Лучи же не совпадают, так как луч o проходит без преломления, а луч e отклоняется в сторону. Им мы и обязаны тем, что видим два изображения. Если кристалл поворачивать на листке бумаги, изображение, соответствующее прошедшему без преломления лучу o , останется неподвижным, а изображение, соответствующее отклоненному лучу e , будет поворачиваться вместе с этим лучом.

С нормалью связано свойство поперечности световых колебаний. Колебания совершаются в плоскости световой волны, и следовательно они перпендикулярны не к лучу, а к нормали. Разность хода двух волн, в случае их интерференции, определяется их расстоянием друг от друга, т. е. измеряется по нормали, а не по лучу. Наконец, законы преломления света, установленные для изотропных сред, сохраняют в кристаллах свою силу не для лучей, а для нормалей.¹

¹ Кроме закона постоянства показателей преломления, который вообще не имеет места для волны e , так как ее скорость распространения различна для разных направлений.

Показатель преломления есть величина, обратная скорости волны, т. е. скорости, измеряемой по нормали, а не по лучу.

Основными элементами кристаллооптической методики являются следующие; 1) нахождение направлений колебаний в кристаллах; 2) наблюдения над разностью хода интерферирующих волн; 3) изменение показателей преломления. Все эти свойства связаны с нормалью, а не с лучами. Поэтому в дальнейшем нам почти не придется пользоваться понятием луча.

Волновые поверхности, которые мы рассматривали, по своему построению являются поверхностями скоростей лучей. (Радиусы волновой поверхности пропорциональны скоростям распространения лучей по данным направлениям.) Волновая поверхность характеризует скорость распространения волны, имеющей своим началом некоторую точку внутри кристалла. На практике нам придется почти всегда иметь дело с плоскими волнами, проходящими сквозь кристалл. Скорость таких волн или, что то же самое, нормалей к ним не выражается волновой поверхностью. В дальнейшем мы познакомимся с другой поверхностью (индикатрисой), более отчетливо выражающей свойства нормалей, чем волновая поверхность.

В заключение остановимся несколько на том, насколько велико может быть в кристалле расхождение между лучом и нормалью. Оно определяется в конечном счете тем, насколько поверхность волны необыкновенной (эллипсоид) отличается по своей форме от шара или, другими словами, насколько отношение осей эллипсоида отличается от единицы. У огромного большинства минералов это отличие весьма мало. Например, у кварца $n_o = 1,544$; $n_e = 1,553$; $1 \frac{n_o}{n_e} = 0,994$. Максимальное расхождение между лучом и нормалью у кварца составляет около $0^{\circ}20'$. У значительного большинства минералов это расхождение лишь немного превышает указанную величину. Только у немногих минералов отношение осей эллипсоида более заметно отличается от единицы. Так, у кальцита (исландский шпат) $n_o = 1,658$, $n_e = 1,486$; $\frac{n_e}{n_o} = 0,896$, а угол между лучом и нормалью доходит почти до $6 \frac{1}{2}^{\circ}$. Этим и объясняется то обстоятельство, что двупреломление впервые было обнаружено именно у исландского шпата.

§ 5. Бирадиали и бинормали. Коническая рефракция

В волновой поверхности двусосных кристаллов прямые OM_1 и OM_2 (рис. 11, с) являются оптическими осями для лучей, т. е. направлениями, по которым оба луча распространяются с одинаковой скоростью. Однако в двусосных кристаллах оптические оси для нормалей или собственно оптические оси не совпадают с оптическими осями для

¹ Оси волновой поверхности пропорциональны скоростям лучей o и e . Мы приводим величины обратные им — показатели преломления.

лучей. Проведем плоскость RS , касательную к волновой поверхности, таким образом, чтобы она касалась одновременно круга и эллипса, изображенных на рисунке 11, с (рис. 14). Радиус OT , перпендикулярный к этой плоскости, и является оптической осью для нормалей (доказательство этого положения не приводим).

Оптические оси для лучей называются б и р а д и а л я м и; оптические оси для нормалей — б и н о р м а л я м и. В дальнейшем, говоря об оптических осях, мы будем иметь в виду исключительно бинормали.

Угол между бирадиалью и соответствующей ей бинормалью, вообще говоря, весьма мал (обычно меньше 1°).

Математик Гамильтон в 1832 г., исследуя теоретически форму волновой поверхности двусосных кристаллов, предсказал своеобразное явление так называемой конической рефракции. Справедливость выводов Гамильтона была на опыте проверена Ллойдом (1833).

Внутренняя коническая рефракция. Пусть по направлению бинормали на кристалл падает плоская волна RS (рис. 14). Она касается волновой поверхности в точках Q и T , лежащих в плоскости чертежа, и, кроме того, как нашел Гамильтон, во всех точках некоторого круга, диаметром которого является TQ . Все прямые, соединяющие центр волновой поверхности с точками этого круга, являются лучами, соответствующими волне RS . Таким образом, в данном случае, одной плоской волне соответствует бесконечное множество лучей, распространяющихся в кристалле по конусу. По выходе из кристалла все лучи становятся перпендикулярными к волне, образуя полый цилиндр, дающий на экране светлое кольцо. Диаметр этого кольца не зависит от расстояния между экраном и кристаллом. Этот диаметр тем больше, чем больше угол между лучами OQ и OT и чем толще взятый кристалл.

Внешняя коническая рефракция. Явление внутренней конической рефракции, как мы видели, является следствием того, что одной плоской волне RS соответствует в кристалле бесконечное множество лучей, распространяющихся по образующим конуса QOT . Внешняя же коническая рефракция имеет место, если в кристалле луч распространяется по бирадиали (OM_2 , рис. 14). Этому лучу соответствует бесчисленное множество плоских волн, касательных к волновой поверхности в точке M_2 . По выходе из кристалла все эти плоские волны распространяются по различным направлениям, причем перпендикулярные к ним лучи расположены по образующим некоторого конуса. Эти лучи дают на экране светлое кольцо,

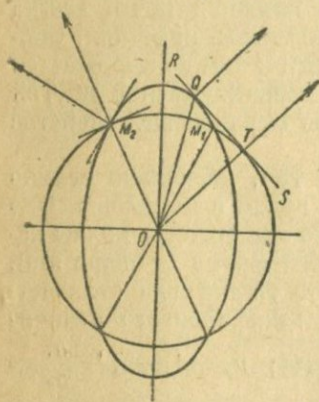


Рис. 14. Справа показана внутренняя, слева — внешняя коническая рефракция.

диаметр которого увеличивается по мере удаления экрана от кристалла.

Явления конической рефракции в кристаллооптической методике не используются. Открытие их (после того как они были предсказаны) имело большое значение, как доказательство правильности наших представлений об оптических свойствах кристаллов.

Глава II

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ

§ 1. Понятие о поляризованном свете

Свет естественный. Световые колебания совершаются перпендикулярно к световой нормали. (Для изотропной среды можно также говорить: перпендикулярно к световому лучу.) Направлений перпендикулярных к данной прямой (нормали или лучу) можно провести бесконечное множество. Естественным светом на-

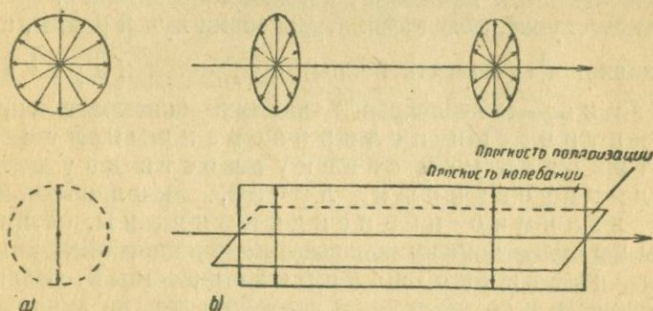


Рис. 15. Направления колебаний в луче естественном (наверху) и линейно поляризованном (внизу): *a*) — вид по направлению луча; *b*) — вид сбоку.

зывается свет, характеризующийся следующими свойствами: 1. В каждый данный момент времени направления колебаний в разных точках луча различны. 2. В каждой данной точке луча направления колебаний в разные моменты времени различны (быстро меняются со временем). 3. Амплитуды колебаний, направленных во все возможные стороны в естественном луче, в среднем равны. Если для какой-либо точки луча отложить во все стороны векторы, пропорциональные амплитудам колебаний по этим направлениям, концы векторов будут расположены по окружности (рис. 15). Свет, испускаемый солнцем и другими накаливаемыми телами, по своим свойствам приближается к естественному, отчего последний и получил свое название.

Свет поляризованный. Если амплитуды колебаний по разным направлениям различны, свет называется **поляризованным**.

Прямолинейная поляризация. Если все колебания совершаются в одном направлении (амплитуды по всем остальным направлениям равны нулю), свет называется **линейно-поляризованным**. В дальнейшем такой свет мы часто будем называть просто **поляризованным**. Плоскость, проведенная через направления колебаний всех точек линейно-поляризованного луча, называется **плоскостью колебаний**. Следует не смешивать с этой плоскостью часто упоминающуюся в учебниках физики **плоскость поляризации**. Под последней понимается плоскость, перпендикулярная к направлению колебаний (рис. 15).

Эллиптическая поляризация — особый вид упорядоченного колебательного движения, когда колеблющаяся частица описывает в плоскости волны (вокруг направления луча) эллипс. В частности, эллиптическая поляризация имеет место, если по одному направлению распространяются с равной скоростью и с некоторой разностью фаз два луча, поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Каждая частица, испытывая одновременно воздействие обоих колебательных движений, движется по эллипсу.

В частном случае, когда амплитуды обоих лучей равны, а разность фаз составляет $\frac{\pi}{2}$ (четверть волны), получается **круговая поляризация** — колеблющаяся частица описывает окружность.

Эллиптически поляризованный луч можно представлять как совокупность двух линейно-поляризованных лучей, колебания которых взаимно перпендикулярны. Этим обстоятельством мы будем широко пользоваться в дальнейшем.

Свет **частично-поляризованный**. Если полной упорядоченности в колебательном движении нет, но амплитуды колебаний, совершающихся в разных направлениях, различны, свет называется **частично-поляризованным**. Степень поляризации выражается в процентах.

§ 2. Поляризация света при отражении и преломлении. Простейшие поляризаторы

Световой луч, падающий под косым углом на поверхность какой-либо среды, частично отражается от этой поверхности, а частично входит в среду и преломляется. При этом и отраженный и преломленный лучи оказываются в некоторой степени поляризованными. В случае изотропной среды колебания преломленного луча совершаются в плоскости падения, а отраженного перпендикулярно к этой плоскости, т. е. параллельно плоскости, от которой произошло отражение (рис. 16).

При изменении угла падения меняется степень поляризации. При некотором угле падения P , называемом **углом поляризации**, отраженный луч оказывается полностью поляризованным. Угол поляризации связан с показателем преломления среды простым соотно-

шением $\operatorname{tg} P = n$. Это соотношение называется законом Брюстера. Закон Брюстера равноценен условию, чтобы преломленный и отраженный лучи были взаимно перпендикулярны (рис. 17). В самом деле $n = \operatorname{tg} P = \frac{\sin P}{\cos P}$ (закон Брюстера), и в то же время $n = \frac{\sin P}{\sin r}$ (закон преломления). Отсюда: $\sin r = \cos P$, т. е. $P + r = 90^\circ$.

Для стекла, у которых $n = 1,5$, угол P приблизительно $= 56^\circ$.

Луч преломленный не поляризуется полностью ни при каких условиях. При угле падения, равном P , степень поляризации его максимальна, но все же далеко не достигает 100%.

На указанных явлениях основано устройство примитивных поляризаторов, т. е. приборов для получения поляризованного света. Простейшим поляризатором служит зеркало из черного стекла,¹ поставленное под углом поляризации к падающему свету. Прибор этот

требует сильного освещения, так как при угле падения $= P$, отражается лишь незначительная часть падающих лучей. Черным зер-

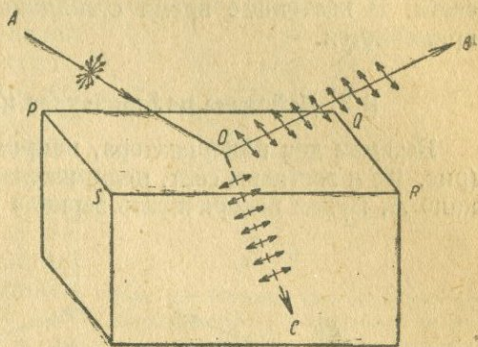


Рис. 16. Колебания преломленного луча OC совершаются в плоскости падения (плоскость ABC), а отраженного OB — перпендикулярно к этой плоскости (параллельно плоскости $PQRS$, от которой произошло отражение).

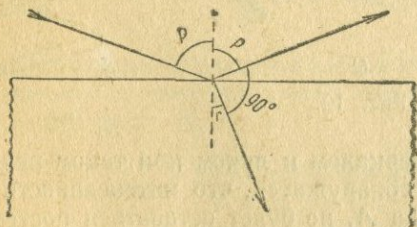


Рис. 17.

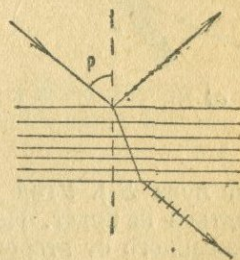


Рис. 18. Стекла́нная стопа.

калом пользуются и в настоящее время, когда необходимо осветить поляризованными лучами большую площадь, например, при исследовании больших кристаллов.

Явление поляризации при преломлении используется в так называемой стеклянной стопе, состоящей из большого числа

¹ При отражении от металла свет не поляризуется.

параллельных стеклянных пластинок, между которыми имеются тонкие воздушные прослойки. Луч света, падающий под углом P на стеклянную пластинку, преломляясь, частично поляризуется. Степень поляризации увеличивается, когда этот же луч проходит через вторую, третью и дальнейшие пластинки (рис. 18). Чтобы степень поляризации приблизилась к 100%, требуется 15—20 пластинок. При этом, вследствие многократного отражения, теряется значительная часть света. В настоящее время стеклянная стопа в кристаллооптике не применяется.

§ 3. Действие поляризатора на поляризованный свет

Возьмем два поляризатора, например, два черных зеркала P и A (рис. 19) и заставим свет, поляризованный зеркалом P , падать на зеркало A . Будем поворачивать зеркало A вокруг вертикальной оси (во-

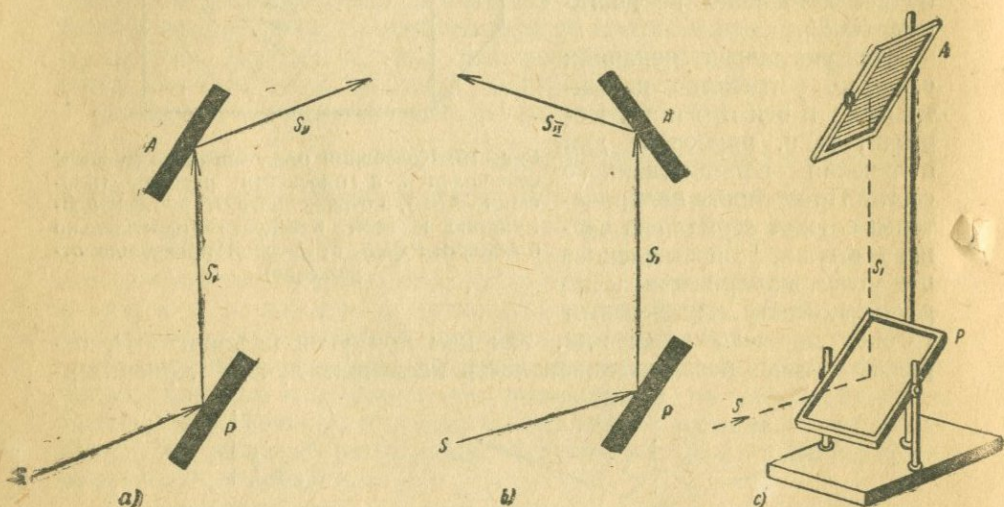


Рис. 19.

круг луча S_1). Угол между зеркалом и лучом при таком вращении меняться не будет. При этом обнаружится, что интенсивность луча, отраженного от второго зеркала A , не будет оставаться постоянной. Она будет максимальна, когда зеркало A занимает положение, показанное на рис. 19, a и b , и будет равна нулю при повороте зеркала A на 90° от этого положения (рис. 19, c). Таким образом, в последнем случае отражения не происходит вовсе, и поляризованный луч S_1 целиком поглощается поляризатором A . При промежуточных положениях зеркала A луч S_{II} имеет некоторую промежуточную интенсивность.

Причина этих явлений выясняется при рассмотрении рис. 20. Здесь поляризованный луч S_1 направлен перпендикулярно к чертежу и пересекает его плоскость в точке O . Вектор OP изображает направление и

амплитуду колебаний луча S_I . Подойдя к верхнему черному зеркалу A , луч S_I частью преломится и поглотится зеркалом, частью отразится, причем колебания преломленного луча должны совершаться в плоскости падения, а отраженного — перпендикулярно к этой плоскости. Пусть OI — направление возможных колебаний луча, отраженного от зеркала A , и OII — направление возможных колебаний преломленного и поглощенного луча. Луч S_I , с направлением колебаний OP , разложится на два луча, направления колебаний которых будут OI и OII . Из механики известно, что разложение гармонического колебания на два совершается по правилу параллелограмма. Проведем из точки P прямые, параллельные OII и OI , получим амплитуды колебаний лучей отраженного (OA) и преломленного (OA_1). Луч с колебаниями OA_1 поглощается черным зеркалом, и мы увидим лишь отраженный луч с колебаниями OA . Обозначим $\angle POA = \alpha$, тогда $OA = OP \cos \alpha$, т. е. амплитуда колебаний луча, пропущенного вторым поляризатором, равна амплитуде колебаний луча, пропущенного первым поляризатором, умноженной на косинус угла между направлениями колебаний обоих лучей.

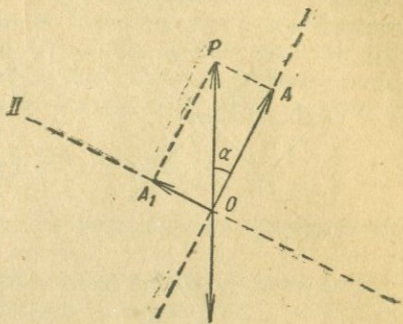


Рис. 20. Разложение линейно поляризованного колебания на два по взаимно перпендикулярным направлениям.

Заменяв амплитуду интенсивностью света ($I = KA^2$), получим:

$$I_1 = I_0 \cos^2 \alpha.$$

Это выражение называется законом Малюса (1808).

В частных случаях при $\alpha = 0^\circ$ или 180° (рис. 19, а и б) $OA = OP$; при $\alpha = 90^\circ$ (рис. 19, с)

$$OA = OP \cos 90^\circ = 0.$$

Второй поляризатор обычно называют анализатором, так как, пользуясь им, можно «анализировать» свет, т. е. выяснить, поляризован ли он и в какой именно плоскости. Если бы луч S_I (рис. 19) был естественным, колебания которого совершаются по всем направлениям, перпендикулярным к S_I , то вращение анализатора A не влияло бы на интенсивность луча S_{II} . Если же луч S_I поляризован, то, найдя положение анализатора A , при котором луч S_{II} оказывается наиболее ярким или, наоборот, совершенно исчезает, мы тем самым узнаем направление колебаний луча S_I .

§ 4. Поляризация света кристаллами

До открытия поляризации света сторонники волновой теории считали, что световые колебания продольны. Само собой разумеется, что поляризация света объяснима только при условии поперечности световых колебаний. Явление поляризации было случайно открыто в 1808 г.

Французский ученый Маллюс взглянул через кристалл исландского шпата на отражение солнца от стекла в окне расположенного напротив здания. Поворачивая кристалл, чтобы наблюдать вращение одного изображения вокруг другого (стр. 22), Маллюс увидел, что оба изображения имеют различную яркость и поочередно то делаются ярче, то затухают. Исследуя это явление, Юнг и Френель (1816, 1817) пришли к следующим выводам: 1. Световые колебания поперечны. 2. Свет при отражении от стекла поляризуется. 3. Оба световых луча, на которые разбивается входящий в кристалл луч, оказываются поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Явление, открытое Маллюсом, может быть объяснено следующим образом. Косо падающий на стекло солнечный луч поляризуется. На рис. 21 луч этот

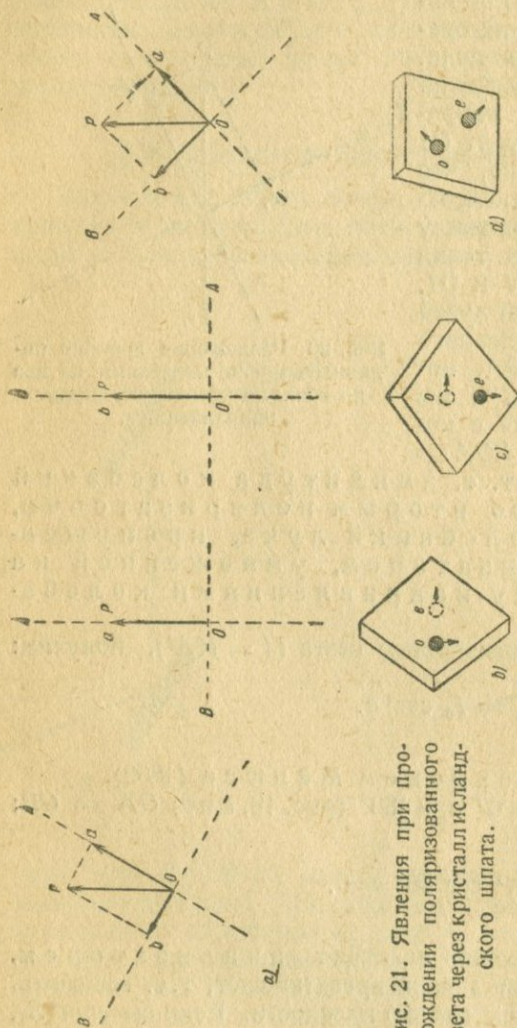


Рис. 21. Явления при прохождении поляризованного света через кристалл исландского шпата.

перпендикулярен плоскости чертежа. OP — направление его колебаний. Пройдя через исландский шпат, он дает два изображения o и e . Лучи o и e поляризованы. Колебания их совершаются в направлениях OA и OB . Амплитуда OP должна будет разложиться

на составляющие по этим направлениям. Получившиеся амплитуды Oa и Ob пропорциональны косинусам углов между OP и направлениями OA и OB (см. предыдущий параграф). Если кристалл поворачивать вокруг направления луча, то в некоторый момент направление OA совпадет с OP (рис. 21, *b*). При этом $Oa = OP \cos 0^\circ = OP$, а $Ob = OP \cos 90^\circ = 0$, т. е. разложения луча на два не произойдет, и мы увидим лишь одно изображение o . Если от этого положения повернуть кристалл на 90° , чтобы с OP совпало направление OB (рис. 21, *c*), то, наоборот, $Ob = OP \cos 0^\circ = OP$; $Oa = OP \cos 90^\circ = 0$. Будет наблюдаться одно изображение e . Когда AO и OB делают с OP равные углы (рис. 21, *d*)

$$Oa = Ob = OP \cos 45^\circ,$$

яркость обоих изображений одинакова. Во всех прочих положениях яркость их различна.

Поляризация света имеет место во всех кристаллах средних и низших сингоний без исключения. Во всех случаях, когда в кристалле по одному направлению идут две световых волны, скорости которых различны, обе эти волны полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях.

§ 5. Устройство призмы Николя

На поляризации света при двупреломлении основано устройство целого ряда поляризаторов, применяемых в кристаллооптике. Поляризаторы эти называются николями по имени изобретателя первого прибора такого рода (1828).

Призма Николя, или просто николь, готовится из удлиненной спайной выколки исландского шпата (отношение длинного ребра к короткому $\approx 3,5$). Верхняя и нижняя грани слегка шлифуются, чтобы углы между ними и длинным ребром равнялись 68° (вместо 71° у естественного кристалла). Затем кристалл распиливается по плоскости MN (рис. 22) и снова склеивается канадским бальзамом.¹

Луч света R , входя в прибор, распадается на лучи o и e . Показатель преломления исландского шпата для обыкновенного луча $n_o = 1,658$, для необыкновенного, если луч идет перпендикулярно к оптической оси, $n_e = 1,486$. В нашем случае луч идет косо к оптической оси и показатель для необыкновенного луча $n'_e \approx 1,515$. Показатель преломления канадского бальзама $\approx 1,54$. Оба луча подходят к прослойке канадского бальзама под весьма пологим углом. Проходит через эту прослойку и выходит из прибора только луч e , луч же o не прохо-

¹ Канадский бальзам получается из сока коры бальзамической канадской ели или сибирской пихты. Употребляется для склеивания оптических стекол.

дит, а испытывает полное внутреннее отражение, так как для него показатель преломления исландского шпата (1,658) значительно больше, чем канадского бальзама (1,54), а угол падения больше предельного (см. стр. 14). Отраженный луч обычно поглощается черной оправой, в которую заключен прибор.

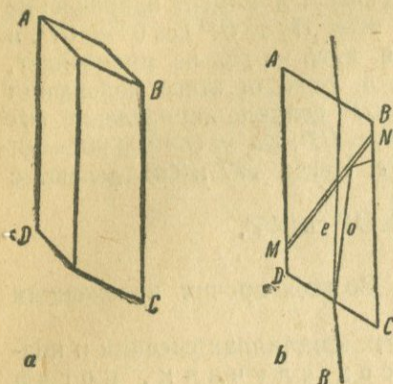


Рис. 22. Схема призмы Николя: а) — внешний вид; б) — продольный разрез.

Призма Николя имеет ряд недостатков. Главнейший из них — малый угол поля зрения, равный 29° (т. е. призма Николя задерживает луч o и пропускает один лишь луч e только в том случае, если в падающем на нее световом пучке нет лучей, наклоненных друг к другу под углом большим 29° или к оси прибора под углом $> 14\frac{1}{2}^\circ$). Если грани CD и AB сделать перпендикулярными к боковым сторонам (чтобы избежать смещения изображения), поле зрения уменьшается до 20° .

В настоящее время применяются более совершенные поляризаторы, поле зрения которых достигает 40° и больше. От призмы Николя они отличаются только положением граней относительно оптической оси и направлением плоскости распада.

§ 6. Турмалиновый поляризатор и поляроид

Призма Николя была не первым кристаллическим поляризатором. Еще раньше использовались в качестве поляризаторов кристаллы турмалина. Турмалин — минерал тригональной сингонии — обладает резко различной прозрачностью для лучей o и e .¹ Луч e свободно проходит через кристалл, в то время как луч o сильно поглощается, и практически уже довольно тонкие пластинки турмалина для него не прозрачны. Поэтому пластинка турмалина, вырезанная параллельно оптической оси, может служить поляризатором, так как она пропускает лишь один линейно-поляризованный луч e .

Главнейшим недостатком турмалина как поляризатора является то, что даже самые прозрачные кристаллы его довольно густо окрашены в голубой, зеленый или розовый цвет.

Турмалиновые поляризаторы были быстро вытеснены николями и в настоящее время не применяются. В самое последнее время появились новые поляризаторы — поляроиды, принцип действия которых в основном тот же, что и у турмалиновых поляризаторов.

¹ Свойство это называется дихроизмом. О нем см. в главе X.

В 1851 г. В. Герапат синтезировал и исследовал ряд соединений иода с сернокислым хинином. Эти соединения получают в виде мелких гексагональных кристаллов, которые чрезвычайно сильно поглощают лучи o (уже при толщине в несколько сотых долей миллиметра они почти непрозрачны для этих лучей), а для лучей e прозрачны и почти бесцветны. Попытки вырастить большие кристаллы, которые можно было бы использовать подобно турмалину, не увенчались успехом. По другому пути пошел Ленд (1932), кристаллизовавший эти соединения в вязкой среде (желатине) и добившийся параллельного расположения получающихся субмикроскопических кристалликов. Полученная таким образом тонкая желатиновая пленка, содержащая множество одинаково ориентированных и тесно прилегающих друг к другу кристалликов этих соединений, обладает свойством поляризатора и получила название **п о л я р о и д а**.

Поляроиды обладают многими преимуществами по сравнению с николями. Их получение не связано с остродефицитным сырьем, каким является исландский шпат. Они могут быть получены практически любого размера. Наконец, что очень важно для целого ряда приборов, их поле зрения весьма велико, достигая 120° и выше. Практически свет, проходящий через поляроид почти под любым углом, оказывается поляризованным.

Некоторым недостатком поляроида является то, что он не совершенно бесцветен, а слегка окрашен в бледножелтоватый цвет. Когда этот недостаток будет устранен или ослаблен (например, применением светофильтров), поляроид сможет совершенно заменить николю в кристаллооптике.

§ 7 Кристалл между скрещенными николями. Погасание

В этом параграфе дается предварительное понятие о том, для чего при изучении оптических свойств кристаллов необходимо пользоваться поляризованным светом.

Расположим последовательно два николя так, чтобы направление колебаний, пропускаемых нижним николем (поляризатором), было перпендикулярно направлению колебаний, которые может пропустить верхний николю (анализатор). Такое положение николей называется **с к р е щ е н н ы м**.

Основываясь на §§ 3—5 этой главы, легко понять, что через скрещенные николи свет пройти не может. Луч, вышедший из поляризатора, будет полностью поглощен анализатором.

В самом деле, в общем случае, когда направления колебаний в николях не совпадают, луч, вышедший из поляризатора с колебаниями OP , войдя в анализатор, разложится на два луча с колебаниями OA и OA_1 (рис. 20). Здесь через OA обозначены колебания того луча, который проходит сквозь анализатор; через OA_1 — колебания того луча, который, дойдя до прослойки канадского бальзама, отражается в сторону. В случае же, когда николи скрещены, OP перпендикулярно к OA и параллельно OA_1 . Амплитуда OA равна нулю ($OA = OP \cos 90^\circ$);

амплитуда OP_1 равна OP ($OA_1 = OP \cos 0^\circ$). Таким образом, в анализаторе будем иметь лишь один луч с колебаниями OA_1 , который уничтожается, отражаясь от канадского бальзама.

Поместим между скрещенными николями кристалл. На рис. 23 свет идет перпендикулярно к плоскости чертежа. OP — направление колебаний лучей, выходящих из поляризатора, OA — из анализатора. В кристалле колебания возможны по взаимно-перпендикулярным направлениям OI и OII .

Вышедшая из поляризатора световая волна, амплитуда которой $= OP$, разобьется в кристалле на две волны. Амплитуда OP разложится по правилу параллелограмма на две составляющих по направлениям OI и OII .

Амплитуда $OM = OP \cos \alpha$; $ON = OP \sin \alpha$. Обе волны с амплитудами OM и ON идут перпендикулярно к плоскости чертежа. Дойдя до анализатора, каждая из этих волн в свою очередь разложится на две с направлениями колебаний OA и OP (OA — направление колебаний волны, которая может пройти сквозь анализатор, OP — направление колебаний волны, которая отражается от прослойки канадского бальзама и поглощается оправой анализатора.)

Амплитуда OM разложится на $Om = OM \sin \alpha$ и $On_1 = OM \cos \alpha$; ON разложится на $On = ON \cos \alpha$ и $On_2 = ON \sin \alpha$.

Колебания Om_1 и On_1 , совершающиеся по направлению OP , принадлежат волнам, которые будут поглощены анализатором. Волны с колебаниями Om и On пройдут через анализатор, вследствие чего кристалл будет виден и окрашен. (Окраска получается в результате интерференции прошедших через кристалл белых лучей.¹) Часть поля зрения, не занятая кристаллом, будет казаться темной.

Это явление позволяет легко отличать кристаллы низших и средних сингоний от тел оптически изотропных. Последние не изменяют направлений колебаний, проходящих сквозь них лучей и между скрещенными николями кажутся темными.

Будем поворачивать кристалл в плоскости, перпендикулярной к световой нормали (т. е. в плоскости чертежа 23). В некоторый момент

¹ Амплитуды Om и On равны между собой: $Om = OM \sin \alpha = OP \cos \alpha \sin \alpha$; $On = ON \cos \alpha = OP \sin \alpha \cos \alpha$. Эти амплитуды на рис. 23 направлены в противоположные стороны n , казалось бы, при интерференции должны уничтожить друг друга. Однако здесь не принята во внимание разность фаз, которая должна иметь место, так как волны OM и ON распространяются в кристалле с разной скоростью. Этот вопрос и вопрос об интерференционных окрасках будут разобраны в главе VI.

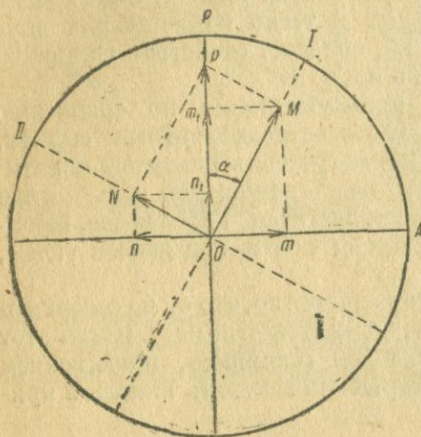


Рис. 23.

OI совпадает с OP , а OII с OA . При этом $\angle \alpha = 0$, а значит и $\sin \alpha = 0$, а амплитуды O_m и O_n , равные $OP \sin \alpha \cos \alpha$, обращаются в нуль. Следовательно, если направления колебаний в кристалле совпадают с направлениями колебаний в скрещенных николях, свет через эту систему не проходит, и кристалл кажется темным.

Физически здесь имеет место следующее. Волна с колебаниями OP , входя в кристалл, не разбивается на две, так как одно из возможных в кристалле направлений колебаний совпадает с OP . Через кристалл пойдет только одна волна с колебаниями по OP . Верхний же николю такие колебания полностью уничтожает.

При полном обороте кристалла совпадение направлений колебаний в нем и в николях, а следовательно и затемнение (погасание) происходят четыре раза, повторяясь через каждые 90° .

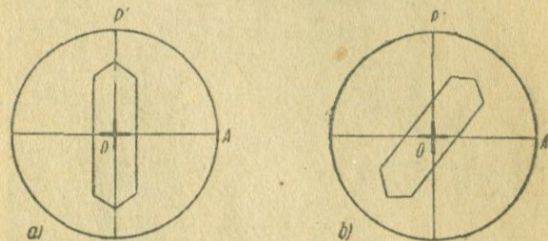


Рис. 24.

Если известны направления колебаний в николях — OP и OA , легко определить направления колебаний в исследуемом кристалле. Для этого надо только повернуть кристалл до погасания. В момент погасания колебания в кристалле расположатся параллельно OA и OP .

Если ребра кристалла в этот момент также окажутся параллельными OA или OP , погасание называется прямым.

Если же ребра в момент погасания не параллельны направлениям колебаний в николях, погасание называется косым.

Очевидно, что прямое погасание имеет место в том случае, когда направления колебаний в кристалле параллельны его ребрам, а косое погасание — когда направления колебаний в кристалле расположены косо к его ребрам (рис. 24).

Глава III

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП

§ 1. Устройство микроскопа

Исследование оптических свойств очень мелких кристаллических зерен (минералы горных пород, продукты химических реакций и пр.) производится при помощи поляризационного микроскопа, который представляет собой микроскоп, снабженный поляризатором, анализатором и некоторыми специальными приспособлениями. В настоящее время этот прибор достиг высокого совершенства и позволяет получать почти исчерпывающую оптическую характеристику микроскопических кристалликов, по которой

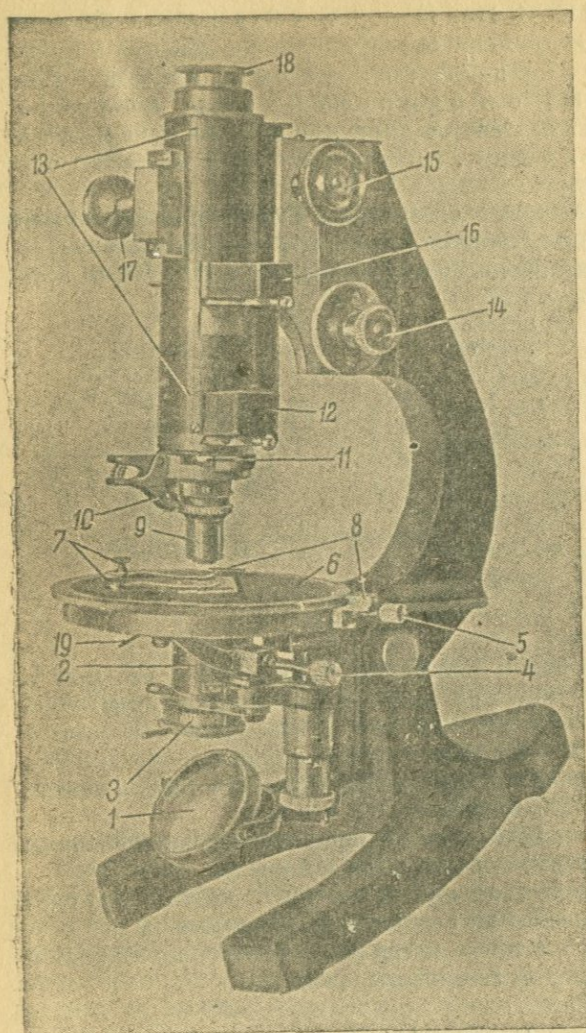


Рис. 25. Поляризационный микроскоп МП-2 производства ООМЗ, Ленинград.

1 — зеркало; 2 — осветительный аппарат; 3 — поляризатор; 4 — рычаг линзы Лазо; 5 — винт для закрепления столика; 6 — предметный столик; 7 — клеммы; 8 — нониус; 9) объектив; 10 — щипцы, прижимающие объектив к тубусу; 11 — отверстие для компенсационных пластинок; 12 — анализатор; 13 — тубус; 14 — микрометрический винт; 15 — кремальера тубуса; 16 — линза Бертра; 17 — кремальера линзы Бертра; 18 — окуляр; 19 — рычаг диафрагмы.

затем производится диагноз вещества.

Прежде чем перейти к характеристике поляризационного микроскопа, кратко напомним основные черты устройства и принцип действия обыкновенного (неполяризационного) микроскопа.

Микроскопом, в широком смысле слова, называется всякий прибор, служащий для рассматривания малых объектов в увеличенном виде. Собственно, микроскоп, или «сложный микроскоп» (в отличие от «простого микроскопа» — лупы), имеет систему линз, разделенную на две части. Первая часть этой системы — объектив, — дает увеличенное, перевернутое, действительное изображение исследуемого объекта. Это изображение рассматривается при помощи второй части — окуляра — так же, как предмет рассматривается в лупу. Современные микроскопы дают увеличение до $2000\times$ и больше и позволяют наблюдать предметы крупностью около $0,15$ микрона.

Общий вид микроскопа показан на рис. 25.

Препарат, смонтированный на предметном стекле, кладется на столик (6) и плотно прижимается к нему двумя клеммами (7). Под

столиком на подвижном рычаге при помощи вилки укреплено зеркало (1), которому можно придать любое положение. Назначение его — освещение прозрачного объекта. Зеркало, при правильном своем положении, должно отражать пучок лучей, идущих от источника света таким образом, чтобы ось отраженного пучка была перпендикулярна к плоскости столика и проходила через его центр. Лучи, отраженные от зеркала, попадают в осветительный

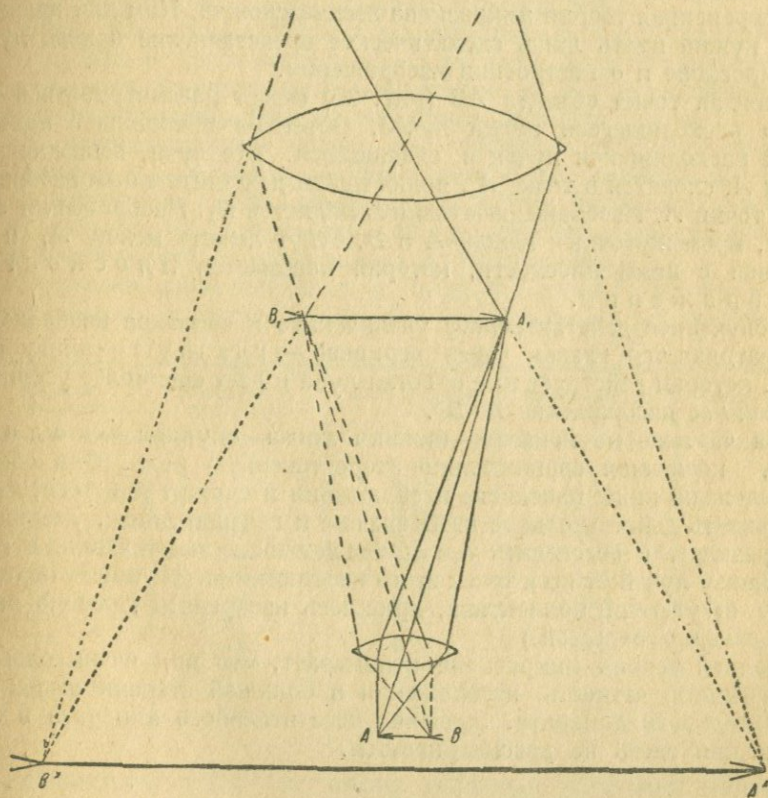


Рис. 26. Ход лучей в микроскопе (упрощенная схема).

аппарат (2), состоящий из нескольких линз, который концентрирует свет на объекте. Пройдя сквозь объект, свет попадает в объектив (9), укрепленный на нижнем конце полой трубы — тубуса (13). Объектив обычно прижимается к тубусу пружинными щипцами (10). Иногда несколько объективов ввинчено в помещенную на нижнем конце тубуса изогнутую круглую пластинку, называемую револьвером. В этом случае перемена объектива достигается простым поворотом револьвера. Сверху в тубус вставлен окуляр (18). Микроскоп снабжен набором разных объективов и

окуляр. Каждой комбинации объектива и окуляра соответствует определенное увеличение.

Вертикальное перемещение тубуса, необходимое для фокусировки объекта, достигается при помощи кремальеры (15). Для точной фокусировки при сильных объективах, обладающих малой глубиной фокуса, помимо кремальеры, приходится прибегать к помощи микрометричного винта (14). Другие части микроскопа будут описаны ниже.

Современная теория микроскопа весьма сложна. Нам для дальнейшего нужно иметь лишь схематическое представление о ходе лучей в микроскопе и о построении изображения.

Каждая точка объекта AB (рис. 26) может рассматриваться как центр расходящегося пучка лучей. Объектив превращает каждый такой расходящийся пучок в сходящийся. Все лучи, вышедшие из точки A , сходятся в точке A_1 , являющейся действительным изображением точки A . Изображением точки B является B_1 . Изображения всех точек, промежуточных между A и B , будут лежать между A_1 и B_1 в одной с ними плоскости, которая называется плоскостью изображения.

Полученное действительное увеличенное и обратное изображение рассматривается глазом через верхнюю — глазную — линзу окуляра, которая действует как простая лупа и дает еще более увеличенное мнимое изображение A^*B^* .

На чертеже не показана нижняя линза окуляра — коллектив, играющая сравнительно второстепенную роль. Она обычно расположена ниже плоскости изображения и служит для того, чтобы приблизить действительное изображение к глазной линзе, уменьшить его размеры и обеспечить тем самым возможность попадания в глазную линзу лучей от всех точек этого изображения. (На нашем чертеже, ввиду отсутствия коллектива, пришлось изобразить глазную линзу несоразмерно большой.)

Полная теория микроскопа показывает, что при очень сильных увеличениях четкость изображения в большой степени зависит от осветительного аппарата. Значение осветительного аппарата в этом отношении здесь не рассматривается.

§ 2. Основные характеристики поляризационного микроскопа

Общее увеличение. Современные методы позволяют достаточно полно исследовать оптические свойства кристаллов, величина которых не меньше 0,01—0,02 мм. Поэтому в кристаллооптике почти не приходится прибегать к очень большим увеличениям. Максимальное увеличение современных поляризационных микроскопов обычно не превышает $700\times$ — $800\times$. В последние годы, в связи с изучением тонкодисперсных кристаллических образований (глины, химические осадки), начинает ощущаться потребность в более сильных увеличениях. Найдены методы, позволяющие такую важную константу, как показатель преломления, определять для частиц крупностью

всего лишь в 1 микрон и даже несколько меньших. В связи с этим желательно, чтобы возможное увеличение поляризационных микроскопов достигало примерно 1200 \times .

Объективы. Общее требование, предъявляемое к объективам (а также и к другим линзам оптической системы) поляризационного микроскопа, — их изотропность. Дело в том, что стекло, как и другие изотропные тела, находясь под влиянием механических напряжений, двуупреломляет. Двуупреломление в линзах объектива часто появляется вследствие того, что линзы сдавливаются оправой.

Объективы, прилагаемые к поляризационным микроскопам, обычно свободны от этого недостатка. Если приходится пользоваться объективами от биологического микроскопа, последние должны предварительно быть проверены на отсутствие двуупреломления.

В поляризационной оптике употребляются почти исключительно объективы ахроматы, — лишь частично устраняющие хроматическую aberrацию. Более совершенные в этом отношении ахроматы обычно не применяются, так как содержат линзы из флюорита, редко свободного от аномального двуупреломления.

Приводим заимствованную у Ринне и Берек¹ таблицу, характеризующую свойства объективов поляризационных микроскопов.

Название объектива	Собственное увеличение	Числовая апертура	Расстояние от объекта в мм	Конусообразный угол в градусах
1	3,2	0,12	31,5	14
2	6	0,20	16,0	23
3	10	0,25	5,8	29
4	20	0,45	2,0	53
5	30	0,65	0,75	81
6L	45	0,55	0,60	81
6 ²	45	0,85	0,32	116
7 ²	62	0,85	0,28	116
7 кор ³	62	0,85	0,28	116
1/7 W ⁴	50	1,00	0,40	93
1/12 ⁵	100	1,30	0,11	119

Объективы ООМЗ не имеют условных номерных обозначений. На оправе каждого объектива помечены его собственное увеличение и числовая апертура.

При работе наиболее часто пользуются объективами №№ 1 (слабый), 2, 3 (средние), 5, 6, 7 (сильные).

¹ Ф. Ринне и М. Берек, Оптические исследования при помощи поляризационного микроскопа, ОНТИ, 1937.

² Объективы 6 и 7 обнаруживают сферическую aberrацию, если толщина предметного стекла выходит за пределы 0,16—0,18 мм.

³ Объектив 7 кор снабжен приспособлением, позволяющим передвигать линзы объектива и уничтожать сферическую aberrацию.

⁴ Для водной иммерсии.

⁵ Для масляной иммерсии.

Окуляры. Обычно применяются окуляры Гюйгенса №№ 1, 2 и 3,¹ реже — 4 и 5. Внутри окуляров № 1 и № 3 помещается круглая стеклянная пластинка с нанесенным на ней тонким крестом. В более старых окулярах натянут крест из двух паутинок.

Окуляр с крестом обычно вставляют в тубус микроскопа так, чтобы одна из нитей лежала в плоскости симметрии микроскопа, а другая — перпендикулярно к ней. Для того чтобы нити сразу приняли надлежащее положение, окуляр имеет сбоку маленький выступ (головку винтика), который вставляется в соответствующую выемку в верхней части тубуса. Часто в тубусе имеется вторая выемка под 45° к первой, позволяющая ставить нити в диагональное положение.

В окуляр № 2 часто вложен окуляр-микрометр — пластинка, на которую нанесена линейка, разделенная на 100 частей

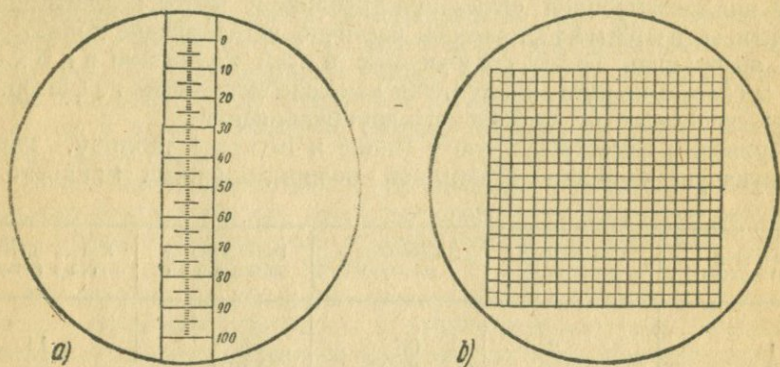


Рис. 27. Окуляр-микрометр: а) — линейный, б) — сетчатый.

(рис. 27, а). Линейка эта служит для измерения величины исследуемых зерен. Вывинтив верхнюю линзу окуляра, можно эту пластинку вынуть и заменить другой с квадратной сеткой, каждая сторона которой разделена на 20 частей (рис. 27, б). Этой сеткой пользуются для измерения площадей, приходящихся на долю разных минералов в исследуемом препарате.

Для некоторых специальных исследований употребляются особые окуляры, здесь нами не упоминаемые.

Столик микроскопа. Столик у поляризационного микроскопа круглый и может вращаться вокруг своей оси. Для измерения углов поворота по краю столика нанесены деления, обычно до 1° . Сбоку имеются один или два нониуса, позволяющие брать отсчет с точностью до десятой части градуса (б). Точность эта почти никогда не используется. Для практической работы достаточно иметь вместо нониуса индекс — черточку, — и доли градуса брать на глаз.

Под столиком или сбоку часто имеется винт, закрепляющий столик в нужном положении.

¹ Соответственные окуляры ООМЗ обозначаются: $5\times$, $6\times$ и $8\times$.

Осветительный аппарат. В связи с тем, что от поляризационного микроскопа не требуется большой разрешающей силы, осветительный аппарат его устроен сравнительно просто. Он состоит из зеркала и двух конденсоров.

Зеркало, как обычно в микроскопах, двойное. При слабых увеличениях и широко, удаленном от микроскопа, источнике света пользуются плоским зеркалом. Во всех остальных случаях — вогнутым.

Нижний конденсор, постоянный, имеет незначительную апертуру. Он делает свет, отраженный от зеркала, несколько сходящимся и усиливает освещенность объекта. Внутри или над этим конденсором помещена ирисовая диафрагма, с помощью которой можно суживать отверстие конденсора и делать пучок лучей более параллельным. В более простых конструкциях, где эта диафрагма отсутствует, аналогичного эффекта можно добиться, опуская при помощи особой кремальеры осветительный аппарат.

Верхний, добавочный конденсор (линза Лазо) имеет высокую апертуру. Употребляется он при больших увеличениях, если требуется сильное освещение объекта, и главным образом при исследовании кристаллов в сходящемся свете (см. гл. VIII, § 2). Добавочный конденсор обычно смонтирован на откидном рычаге, поворотом которого он, в случае необходимости, включается в осветительную систему.

Апертура добавочного конденсора составляет около 0,9. Иногда к микроскопу прилагается второй добавочный конденсор с апертурой до 1,4, который может быть помещен на место первого. Этот конденсор употребляется исключительно при работе с иммерсионными объективами.

Поляризационная система. Поляризационный микроскоп имеет два николя. Нижний — поляризатор — помещен под конденсором в общей с ним обойме. Верхний — анализатор — находится в тубусе микроскопа между объективом и окуляром. Анализатор может выдвигаться из тубуса и тем самым выключаться из оптической системы микроскопа. Во всех хороших микроскопах под и над анализатором находятся линзы, закрепленные в общей с ним оправе, нижняя из которых делает входящий пучок лучей параллельным, а верхняя снова возвращает лучам их первоначальные направления. Это дает возможность широкому пучку лучей пройти через сравнительно небольшой николь. Кроме того, устраняются искажения в ходе лучей, возможные при их прохождении через анализатор.

Нижний николь (поляризатор) может вращаться в своей обойме вокруг вертикальной оси. По краю обоймы обычно нанесены деления. Вращая поляризатор, можно приводить николи в скрещенное, параллельное или любое другое положение. В больших моделях анализатор также может поворачиваться на 100—120°.

Иногда микроскоп снабжен приспособлением для синхронного вращения обоих николей, состоящим из вертикальной штанги, с которой соединены оба николя. С этой же штангой соединен нониус, который скользит по лимбу столика микроскопа и позволяет отсчитывать углы поворота.

Вращение обоих николей при неподвижном столике принципиально равнозначно вращению столика относительно неподвижных николей. На практике в ряде случаев оказывается удобнее вращать именно николи, а не столик.

В некоторых специальных случаях требуется, чтобы анализатор находился непосредственно перед глазом над окуляром. В таких случаях на тубус микроскопа поверх окуляра помещается особый накладной анализатор, вставленный в широкую цилиндрическую оправу. По краю оправы обычно нанесены деления, а в верхней части тубуса имеется выступ, на котором нанесена черточка, позволяющая ставить накладной анализатор в требуемое положение и измерять углы его поворота. При работе с накладным анализатором постоянный анализатор, конечно, должен быть выдвинут из тубуса.

Линза Бертрана. Эта линза находится между окуляром и анализатором и так же, как последний, может выдвигаться из тубуса. Со специальным назначением этой линзы мы познакомимся в главе VIII. Здесь упомянем только о том, что линза Бертрана может служить слабым объективом с большим полем зрения. При вдвинутой линзе Бертрана и удаленном объективе можно наблюдать одновременно весь препарат с увеличением примерно в 4 раза (при окуляре № 3).

Применение линзы Бертрана в качестве объектива возможно не для всех микроскопов. В некоторых моделях, главным образом старых систем, фокусное расстояние этой линзы меньше, чем ее расстояние от столика микроскопа при крайнем нижнем положении, а поэтому сфокусировать ее на плоскость столика невозможно.

Помимо перечисленных выше, поляризационный микроскоп имеет еще целый ряд деталей и принадлежностей, которые будут описываться дальше по мере надобности.

О с в е щ е н и е. Лучше всего иметь к микроскопу специальный осветитель, представляющий собой укрепленный на штативе фонарь. Источником света служит точечная лампочка, помещенная в фокусе коллиматорной линзы, предназначенной для получения параллельного пучка лучей. Прежде чем попасть на зеркало микроскопа, этот параллельный пучок проходит через белое или голубоватое матовое стекло.

При некоторых специальных работах, когда требуется свет определенного состава, на место матового стекла ставится светофильтр. Осветитель включается в электросеть через реостат, дающий возможность регулировать интенсивность светового пучка. Такой осветитель позволяет получить весьма яркое освещение объекта.

На практике очень яркое освещение требуется сравнительно редко, и в большинстве случаев можно обойтись значительно более простым осветителем. Так, вместо точечной лампочки можно взять любую электролампочку с возможно маленькой светящейся нитью. Можно обойтись и без коллиматорной линзы. Наконец, можно воспользоваться обыкновенной настольной лампой, ввинтив в патрон молочную

или матовую лампочку или даже обыкновенную лампочку, закрыв ее бумажной калькой или поставив перед ней матовое стекло.

Если не требуется интенсивного освещения, можно пользоваться любым достаточно сильным источником света, если предварительно капелькой глицерина прикрепить к нижнему концу поляризатора круглое матовое стеклышко подходящего диаметра.

Работник, желающий пользоваться естественным освещением,¹ должен иметь в виду, что только свет, отраженный от плотного белого облака, является вполне естественным. Свет же от ясного неба всегда поляризован и иногда в весьма значительной степени. Как бы ни был ярок дневной свет, поле зрения микроскопа может оказаться недостаточно освещенным, если плоскость поляризации падающих на зеркало лучей не совпадает с плоскостью поляризации нижнего николя и если степень поляризации этих лучей достаточно высока.

Вредное влияние поляризации дневного света можно устранить, изменяя положение микроскопа относительно падающих лучей. Так, например, если наблюдатель, сидя лицом к окну, не может добиться яркого освещения поля зрения, следует сесть боком к окну и соответственно изменить положение микроскопа. Если при первом положении микроскопа плоскость поляризации падающих лучей была перпендикулярна к плоскости колебаний поляризатора, то при втором положении эти плоскости будут параллельны и наоборот.²

В спектре дневного света интенсивность лучей коротких волн несколько выше, чем в свете обычных лампочек накаливания. Если после продолжительной работы с дневным светом перейти к электрическому, бесцветные минералы будут казаться слегка желтоватыми. При обратном переходе — от электрического освещения к дневному — эти же минералы будут казаться голубоватыми. Поэтому лица, систематически работающие с дневным светом, при переходе к электрическому часто вставляют в осветитель «фильтр дневного света» — голубоватую стеклянную пластинку, чтобы приблизить состав света к дневному. Вместо такого фильтра можно ставить между источником света и зеркалом микроскопа колбу, наполненную очень слабым раствором медного купороса, имеющим голубоватый цвет. При соответствующем подборе диаметра этой колбы и ее расстояния от источника света она, благодаря своей сферической форме, может одновременно служить и коллиматором.

§ 3. Определение общего увеличения микроскопа и измерение размеров микроскопических частиц

Общее увеличение микроскопа для каждой комбинации объектива и окуляра обычно определяется при помощи объектметра. Последний представляет собой линейчку длиной в 1 или 2 мм, разделенную до 0,01 мм. Эта линейчка нанесена на пред-

¹ Прямым солнечным светом нельзя пользоваться вследствие его большой интенсивности.

² Подробности о поляризации дневного света см. О. Д. Хвольсон, Курс физики, т. II, гл.: «Поляризация света», «Поляризация солнечного света».

метном стекле и прикрыта покровным. Объект-микрометр является одной из принадлежностей микроскопа.

Для определения увеличения объект-микрометр помещают на столик микроскопа параллельно вертикальной нити и тщательно фокусируют. Рядом с микроскопом, параллельно той же нити, помещают обыкновенную линейку с миллиметровыми делениями. Линейка должна быть удалена от глаз наблюдателя на расстояние ясного зрения (25 см). Смотря одним глазом на линейку, а другим в то же время через микроскоп на объект-микрометр, можно определить во сколько раз увеличивает микроскоп деления объект-микрометра. Если, например, 50 делений объект-микрометра (0,50 мм) соответствуют на линейке 60 мм, то увеличение равно $60 : 0,5 = 120$. На рис. 28 — 20 делений объект-микрометра отвечают 20 мм линейки. Увеличение равно $20 : 0,2 = 100$.

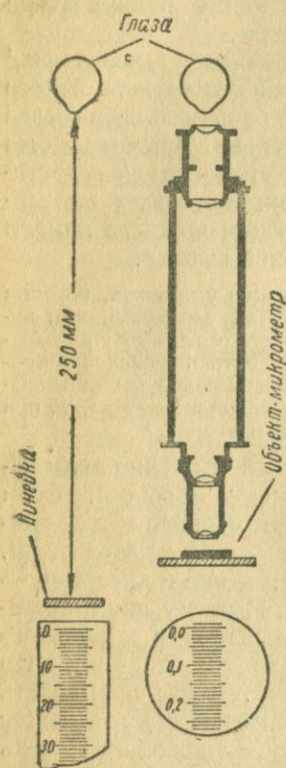


Рис. 28. Определение общего увеличения микроскопа.

При исследовании кристаллов обычно почти не встречается необходимости точно знать увеличение микроскопа. Гораздо чаще приходится измерять величину микроскопических кристаллов. Для этой цели пользуются окуляром, снабженным окуляр-микрометром, о котором упоминалось выше (рис. 27). Цена деления окуляр-микрометра при разных объективах определяется с помощью объект-микрометра.

Кроме этого, следует при помощи объект-микрометра измерить диаметр поля зрения при разных комбинациях окуляров и объективов. Зная диаметр поля зрения, можно, не прибегая к окуляр-микрометру, составить приблизительное суждение о величине зерна, прикинув на глаз, какую часть диаметра поля зрения составляет диаметр данного зерна.

Полезно составить и приложить к микроскопу табличку, в которой указаны цена деления окуляр-микрометра при разных объективах и диаметр поля зрения при разных объективах и окулярах.

§ 4. Центрировка микроскопа

Исследуемый объект (кристаллическое зерно) обычно помещается в центр поля зрения (в точку пересечения нитей окулярного креста), т. е. на ось оптической системы микроскопа. Для работы необходимо, чтобы при вращении столика этот объект не смещался. Очевидно, это будет иметь место только в том случае, если, как говорят, микроскоп

центрирован, т. е. ось вращения столика совпадает с осью оптической системы. В противном случае, при нецентрированном микроскопе, когда ось вращения столика не проходит через центр поля зрения, предмет, помещенный в центр поля, при вращении столика будет описывать окружность вокруг оси столика, проходящей где-то в стороне. На рис. 29 показаны пути, которые описывают при вращении столика точки, лежащие в поле зрения, если микроскоп центрирован (*a*) и если он не центрирован (*b*).

Центрировка микроскопа состоит в совмещении оси столика с осью оптической системы. Она осуществляется при помощи двух центрировочных винтов, которые, нажимая на объектив, перемещают его параллельно самому себе и тем самым изменяют положение оси оптической системы. В микроскопах старых конструкций и в некоторых современных (Reichert, Вена) центрировочные винты находятся в нижней части тубуса над объективом. В таких микроскопах приходится производить

центрировку при каждой перемене объектива вследствие того, что оси разных объективов имеют обычно не вполне одинаковое положение относительно их оправ. А так как менять объективы при работе приходится очень часто, центрировка отнимает заметную часть рабочего времени. Поэтому уже давно делались попытки конструирования микроскопов, не нуждающихся в центрировке. Например, в не-

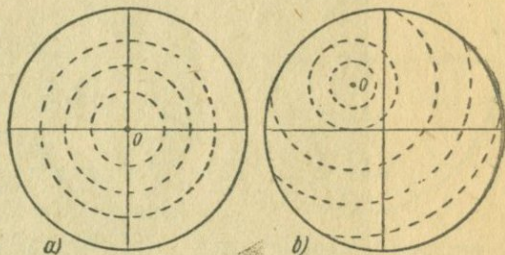


Рис. 29. Пути точек в поле зрения микроскопа при вращении столика: *a*) — микроскоп центрирован; *b*) — микроскоп децентрирован.

которых моделях нижняя часть тубуса, в которую вставляется объектив, соединена со столиком и вращается вместе с ним (рис. 30). При такой конструкции надобность в центрировке, конечно, отпадает. Модели с синхронно вращающимися николями, о которых говорилось выше, также не нуждаются в центрировке.

В современных моделях проблема центрировки разрешена путем переноса центрировочных винтов из тубуса в оправы самих объективов. Благодаря этому каждый объектив центрируется независимо от других, и надобность в повторной центрировке при каждой смене объектива отпадает.

В наиболее распространенной модели винты расположены под углом в 120° друг к другу (под 60° к плоскости симметрии микроскопа). Головки-ключи к этим винтам хранятся отдельно и вставляются только на время центрировки. В микроскопах, снабженных револьвером, каждое гнездо револьвера имеет свою пару центрировочных винтов. Поэтому вставленные в эти гнезда объективы также центрируются независимо друг от друга.

Техника центрировки. Работающий с микроскопом должен уметь производить эту операцию быстро и точно, поэтому рассмотрим подробно производство ее в разных встречающихся на практике случаях.

Опытный работник, немного повращав столик, обычно замечает точку поля зрения (точка *O* на рис. 29 б), которая остается неподвиж-

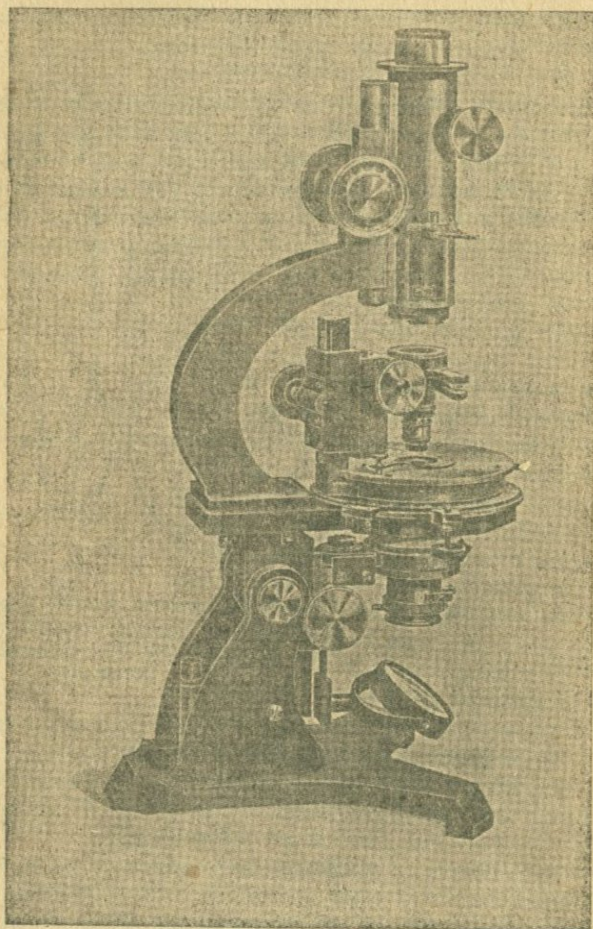


Рис. 30. Микроскоп, объектив которого вращается вместе со столиком.

ной при вращении и вокруг которой вращаются все остальные точки. Если при помощи центрировочных винтов совместить эту точку с центром поля, — центрировка закончена. Точная центрировка достигается в несколько приемов.

Если требуется особо точная центрировка или если работник не может заметить в поле точку, остающуюся неподвижной (особенно

это касается начинающих), можно рекомендовать следующий прием, применимый при любом расположении центрировочных винтов. Надо:

а) Найти в поле зрения возможно мелкий, но хорошо заметный предмет (например, темную точку) и, двигая препарат по столику, поставить этот предмет в центр поля (на крест нитей).

б) Повернуть столик на 180° . Наш предмет при этом опишет полуокружность. Ось вращения столика находится на середине расстояния между новым положением предмета и крестом нитей (точка O на рис. 31).

с) Разделить на-глаз пополам расстояние от предмета до креста нитей и, двигая препарат по столику, передвинуть наш предмет на середину этого отрезка (в точку O , рис. 31). Теперь предмет находится на оси вращения столика, являясь как бы репером, отмечающим ее положение.

д) Вращая центрировочные винты, совмещаем наш предмет, а значит и ось вращения столика, с крестом нитей.

Если все операции были произведены правильно, микроскоп центрирован.

Небольшая погрешность может иметь место вследствие того, что, производя операцию «с», работник не вполне точно поставил предмет на ось вращения столика. Произведя операции «а», «б», «с», «д» повторно, добиваемся желаемой точности центрировки.

В тех конструкциях, в которых центрировочные винты расположены под 90° друг к другу и совпадают с нитями креста, ход центрировки может быть несколько упрощен, а именно, в место операций «с» и «д» делаем операцию «с'», — одним винтом перемещаем предмет на половину расстояния, отделяющего его от горизонтальной нити, а затем другим — на половину расстояния от вертикальной нити (рис. 32). Очевидно, при этом предмет перейдет в точку, где перед этим находилась ось вращения столика, а сама ось совместится с крестом нитей.

Изложенные приемы, очевидно, применимы лишь в том случае, когда предмет, поставленный в центр, при повороте столика на 180° не уходит за пределы поля зрения, т. е. когда ось вращения столика удалена от центра не более, чем на половину радиуса поля. На практике может иногда оказаться, что ось находится на большом расстоянии от центра и даже вообще за пределом поля зрения.¹ В этом слу-

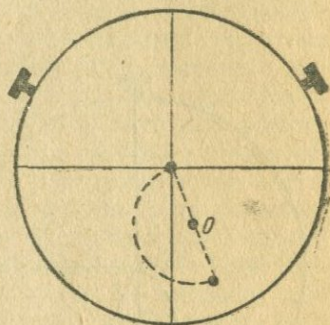


Рис. 31. Центрировка микроскопа при центрировочных винтах, расположенных под 120° .

¹ В этом случае, прежде чем начать центрировку, необходимо убедиться, правильно ли вставлен объектив.

чае прежде чем центрировать по изложенному способу, надо привести ось вращения столика на достаточно близкое расстояние от центра поля. Для этого поворачиваем столик на некоторый угол по и против часовой стрелки и по форме дуг, которые описывают при этом находящиеся в поле зрения предметы, узнаем, в каком направлении от центра расположен выход оси вращения (точка O , рис. 33). Если теперь заставить при помощи центрировочных винтов предметы, видимые в поле, смещаться в противоположном направлении, ось вращения будет приближаться к центру. Когда она приблизится настолько, что поставленный в центр предмет при вращении не покидает поля, заканчиваем центрировку обычным способом.

Для работы с микроскопом, который приходится центрировать при каждой смене объектива, можно рекомендовать прием, значитель-

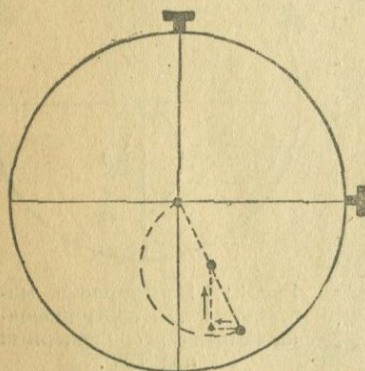


Рис. 32. Центрировка микроскопа при взаимно перпендикулярных центрировочных винтах.

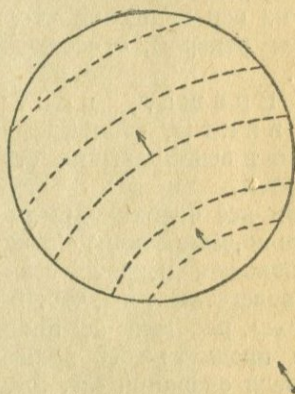


Рис. 33. Стрелки показывают направление, в котором следует смещать предметы центрировочными винтами, чтобы ось вращения приблизилась к центру.

но сокращающий потребное на центрировку время. Пусть при некотором объективе микроскоп центрирован и центр исследуемого предмета помещен на крест нитей. При этом ось вращения столика также проходит через центр предмета. Меняем объектив. Если центрировка этим нарушилась, наш предмет окажется смещенным, но ось вращения столика попрежнему проходит через центр предмета. Теперь достаточно, не двигая препарат, совместить при помощи центрировочных винтов центр предмета с крестом нитей, чтобы микроскоп снова оказался центрированным.

Иногда, если микроскоп стар и изношен, может случиться, что предмет, найденный и поставленный на крест нитей при центрированном слабом объективе, после смены объектива на сильный вовсе не оказывается в пределах поля. В этом случае надо, не трогая препарат, определить по способу, изложенному выше, где находится ось вращения столика, и привести ее (винтами) в пре-

дела поля. Вместе с осью придет в поле зрения и наш предмет, через центр которого проходит эта ось. Когда центр предмета окажется на кресте нитей, микроскоп снова будет центрированным.

В заключение настоящего раздела напомним начинающему работнику, что центрировать нужно только тогда и с той степенью точности, когда и с какой степенью точности это необходимо для выполнения стоящей перед ним задачи. Как увидим дальше, некоторые определения возможны только при очень точно центрированном микроскопе, другие же требуют лишь приблизительной центрировки.

§ 5. Приведение микроскопа в рабочее положение и основные поверки

Почти все микроскопы имеют сгибающийся штатив, позволяющий наклонять микроскоп. При работе прибор устанавливается так, чтобы было удобно смотреть в него сидя и не наклоняясь. Если штатив у микроскопа несгибающийся, рекомендуется заказать наклоняющуюся деревянную подставку, на которую ставится микроскоп при работе.

О с в е щ е н и е. Как уже указывалось, ось светового пучка, отбрасываемого зеркалом, должна совпадать с осью оптической системы микроскопа. Кроме того, все поле зрения должно быть освещено по возможности равномерно. Для получения правильного освещения начинающему может быть рекомендован следующий способ. При слабом или среднем увеличении и открытой диафрагме (и, конечно, при выдвинутом анализаторе), поворачивая зеркало, добиваются хотя бы частичного освещения поля зрения и фокусируют микроскоп. Затем вынимают окуляр и, смотря в тубус микроскопа, наблюдают изображение источника света. При правильном положении зеркала это изображение должно занимать все поле зрения или его центральную часть.

Ф о к у с и р о в к а. Перемещение тубуса, для наведения на фокус, производится путем вращения кремальеры. Некоторые затруднения могут возникнуть при фокусировании сильных объективов, имеющих очень маленькое фокусное расстояние.

Глубина фокуса¹ таких объективов также очень мала, и, опуская тубус, легко пропустить нужное положение и раздавить объективом препарат. Поэтому начинающему рекомендуется сначала опустить тубус так, чтобы объектив слегка касался препарата, и затем, очень медленно поднимая тубус, следить за появлением изображения.

Микрометрическим винтом следует пользоваться только для окончательной наводки на фокус при сильных объективах, после того как изображение уже появилось. При работе с микроскопом надо приучить себя держать открытыми оба глаза. Пока привычка к этому не выработалась, можно прикрывать глаз рукой или специальным экраном, надеваемым на верхнюю часть тубуса. Если систематически при работе

¹ Под глубиной фокуса здесь понимается тот интервал положений тубуса микроскопа (при его вертикальном перемещении), в пределах которого можно видеть предмет.

с микроскопом держать один глаз зажмуренным, развивается астигматизм (неодинаковая кривизна хрусталика глаза в разных направлениях).

Микроскоп, как всякий точный прибор, нуждается в целом ряде проверок и установок. Некоторые из них (проверка изотропности линз объектива, центрировка) уже отмечались. Здесь опишем некоторые проверки и установки, производить которые приходится каждому работающему с микроскопом.

Установка нитей креста на ясное зрение. Нити находятся между линзами окуляра в плоскости действительного изображения предмета (см. стр. 38) и резко видны при некотором определенном положении верхней (глазной) линзы окуляра. Чтобы найти это положение, вынимаем окуляр и смотрим через него на какой-либо светлый, освещенный предмет (лист бумаги, матовую лампу, небо). Глазная линза со своей оправой может несколько перемещаться вверх и вниз в оправе окуляра. Перемещая эту линзу, добиваемся того, чтобы нити резко выделялись на светлом фоне. Это и будет требуемое положение линзы. Для разных глаз оно может быть различным.

Проверка взаимной перпендикулярности нитей креста. Произведя центрировку, выбираем в препарате какую-либо хорошо выраженную прямую линию и помещаем ее близ центра поля. Вращая столик, устанавливаем эту линию сначала параллельно одной, а затем другой нити креста. В обоих положениях берем отсчеты по лимбу столика. Разность этих отсчетов должна быть равна 90° .¹

Установка николей в скрещенное положение. Вынув из тубуса объектив и окуляр и выключив анализатор, направляем зеркалом свет в тубус так, чтобы изображение источника света (матовой лампы) занимало все поле зрения или его среднюю часть. Включаем анализатор. Если николи скрещены, то в зависимости от их конструкции будет виден или широкий темный крест с ветвями, параллельными направлениям колебаний в поляризаторе и анализаторе, или широкая темная балка, проходящая через середину поля зрения и параллельная колебаниям поляризатора. Если поляризатор повернуть в его оправе на незначительный угол от скрещенного положения, то середина поля зрения просветляется. Темный крест распадается на две ветви гиперболы, которые быстро уходят за пределы поля. В случае, когда видна одна темная балка, она при повороте поляризатора смещается с центра и также уходит за пределы поля зрения. На практике во многих случаях установка николей в скрещенное положение производится проще, а именно — при слабом или среднем увеличении, осветив поле зрения, включают анализатор и, если поле недостаточно затемнено, поворачивают поляризатор до максимального затемнения поля.

Проверка совпадения нитей креста с направлениями колебаний, пропускаемых ни-

¹ Как поступать при неполной перпендикулярности нитей креста, указано на следующей странице.

колями. В правильно юстированном микроскопе николи ориентированы так, что направления пропускаемых ими колебаний параллельны нитям окулярного креста. Проверить это можно, взяв какой-либо кристалл, обладающий заведомо прямым погасанием. Совместив ребро такого кристалла с одной из нитей, вдвигаем анализатор. Кристалл при этом будет на погасании. Слегка поворачивая в обе стороны столик, убеждаемся в том, что погасание кристалла в этот момент было максимальным.

Если анализатор микроскопа также может поворачиваться вокруг своей оси, можно, в случае обнаружения погрешности в положении николей, эту погрешность устранить. В этом случае установка николей в скрещенное положение и совмещение направлений колебаний в них с нитями креста производится очень точно по способу Вейнштейна. Для этого 1) ставим ребро кристалла, обладающего прямым погасанием, параллельно одной из нитей (при выключенном анализаторе); 2) вдвигаем анализатор и поворачиваем поляризатор до тех пор, пока кристалл не сравняется с окружающим его фоном по своей освещенности, — это произойдет тогда, когда колебания луча, выходящего из поляризатора, будут параллельны одному из направлений колебаний в кристалле, т. е., следовательно, одной из нитей креста; 3) медленно поворачиваем анализатор. Освещенность поля при этом будет меняться. Освещенность кристалла при правильной установке поляризатора все время будет равна освещенности поля. Если при каком-либо положении анализатора кристалл отличается от поля, надо слегка повернуть поляризатор, чтобы кристалл опять стал невидим. Установка закончена, если кристалл, при повороте анализатора на 180° , все время будет иметь окраску поля.

Заметив на обойме поляризатора деление, отвечающее правильному его положению, приступают к юстировке анализатора, которая производится точно так же, а именно — поворачиваем анализатор, пока кристалл не приобретет окраску поля; затем, вращая поляризатор на 180° , убеждаемся, что кристалл все время освещен так же, как и поле.

В редких случаях, когда нити окулярного креста не перпендикулярны друг к другу, при юстировке николей колебания одного из них совмещаем с одной нитью, а колебания другого располагаем перпендикулярно. В дальнейшем при работе надо помнить, относительно какой из нитей произведена юстировка.

Определение направления колебаний, пропускаемых поляризатором. Для исследования некоторых свойств кристаллов необходимо заранее определить, с какой из нитей креста совпадает направление колебаний, выходящих из поляризатора. Способ производства этого определения изложен ниже, в главе X.

Проверка правильности вращения столика. Ось столика при вращении должна оставаться неподвижной. Иногда, особенно в старых подержанных микроскопах, она слегка смещается. Чтобы обнаружить этот дефект, с максимальной точностью

центрируем микроскоп. Помещенный в центр поля мелкий предмет (точка) при вращении столика должен оставаться неподвижным. Если этот предмет обнаруживает неправильные движения, это указывает на то, что столик при вращении несколько смещается или, как говорят, «бьет». Если смещение превышает 0,01—0,02 мм, целый ряд определенных на мелких кристаллах не может быть произведен. Обычно в таких случаях приходится перетачивать ось столика.

Иногда, работая с сильным объективом, можно заметить, что предмет при вращении столика периодически то выходит из фокуса, то снова становится ясно видимым. Это также указывает на серьезный дефект — изменение положения плоскости столика при вращении.

§ 6. Микроскопические препараты

В заключение настоящей главы скажем несколько слов о препаратах для микроскопического исследования.

Оптические свойства мелких кристаллов изучаются в шлифах и в порошковых препаратах.

Ш л и ф представляет собой тонкую, по возможности плоскопараллельную пластинку, приготовляемую посредством шлифования из плотного кристаллического агрегата (горная порода, сплав и т. п.). Иногда шлифы готовят и из рыхлых объектов, предварительно проваренных, для придания им прочности, в канадском бальзаме. Толщина шлифов обычно колеблется между 0,02—0,03 мм, чаще всего около 0,025—0,027 мм. Шлиф приклеен канадским бальзамом к предметному стеклу, имеющему толщину около 1 мм. Размеры предметного стекла около 25 × 50 мм. Сверху шлиф прикрыт тонким покровным стеклом, также приклеенным при помощи канадского бальзама. Толщина покровного стекла 0,1—0,2 мм. Размеры от 15 × 15 до 20 × 20 мм.

Приготовление шлифов подробно описывается в специальных руководствах по методам петрографических исследований.

Порошковые или иммерсионные препараты приготовляются из рыхлых объектов (песок, глина, кристаллический порошок). Плотные объекты предварительно измельчаются. Подлежащий исследованию порошок помещается на предметное стекло и покрывается покровным. В простраство между стеклами впускается капля жидкого канадского бальзама или какой-либо жидкости с известным показателем преломления. Приготовление порошковых (иммерсионных) препаратов детально описано в XX главе этой книги.

Шлифы применяются главным образом при петрографических исследованиях. Они необходимы, когда требуется выяснить структуру данного кристаллического объекта и соотношения между отдельными слагающими его компонентами. Определение же кристаллов в порошковых препаратах обычно удобнее, чем в шлифах. В частности, как увидим дальше, в порошковых препаратах производится измерение показателей преломления кристаллов.

Глава IV

ОПТИЧЕСКАЯ ИНДИКАТРИСА

§ 1. Закон эллипсоида

Оптические свойства кристаллов весьма многообразны и, кроме того, различны в разных направлениях. Для того чтобы удобнее представить себе эти свойства и их изменения в зависимости от направления, пользуются различными вспомогательными геометрическими поверхностями. С одной из таких поверхностей — поверхностью волны (поверхность скоростей лучей) мы уже познакомились (гл. I, § 2). Этой поверхностью удобно пользоваться для нахождения направлений распространения световых лучей в кристалле, если даны направления оптических осей кристалла и положение кристаллической пластинки относительно светового луча в воздухе (гл. I, § 4). Эта поверхность реальна, при некоторых условиях ее можно даже наблюдать, но требованиям микроскопии кристаллов она не удовлетворяет. При микроскопическом исследовании приходится иметь дело не с лучами, а 1) с нормальями, 2) с направлениями колебаний, которые совершаются перпендикулярно к нормальям, и 3) с разностями хода, которые измеряются по нормальям. Все эти данные не получаются непосредственно при рассмотрении волновой поверхности. В теоретической кристаллооптике выводится целый ряд более или менее сложных геометрических поверхностей, уже не реальных, но отображающих оптические свойства кристаллов. Простейшие из этих поверхностей имеют форму эллипсоида.

Закону эллипсоида подчинены не только оптические свойства кристаллов. Звуко- и теплопроводность, упругие и электрические свойства кристаллов также могут быть выражены эллипсоидом. (Вообще можно доказать, что все те свойства кристалла, которые непрерывно меняются с направлением, подчиняются закону эллипсоида.)

Закон эллипсоида можно сформулировать так. Любое физическое свойство анизотропной среды, непрерывно изменяющееся с направлением,¹ может быть выражено эллипсоидом, каждый радиус-вектор которого в определенном масштабе представляет величину данного свойства для данного направления.

§ 2. Поляризация и двупреломление света в кристаллах как следствие закона эллипсоида

Явления поляризации и двупреломления рассматривались выше чисто эмпирически, без выяснения обуславливающих их причин. Можно показать, что эти явления необходимо следуют из закона эллипсоида.

¹ Условие непрерывности в данном случае означает, что бесконечно малому изменению направления в кристалле соответствует бесконечно малое изменение в величине свойства.

Пусть на кристаллическую пластинку A (рис. 34) в точке O падает под прямым углом (нормально к плоскости чертежа) естественный луч. Из точки O отложим по всем направлениям векторы, пропорциональные сопротивлениям, которые оказывает кристаллическая среда колебаниям, совершающимся по этим направлениям. Из закона эллипсоида следует, что концы всех этих векторов дадут некоторый эллипс. Короткая ось эллипса OX есть направление, по которому колебания испытывают минимальное сопротивление. Всякое колебание, не совпадающее с направлением наименьшего сопротивления, должно разложиться по правилу параллелограмма на два составляющих колебания. Одно — по этому направлению OX , а другое — по перпендикулярному к нему направлению OY (направление наибольшего сопротивления).

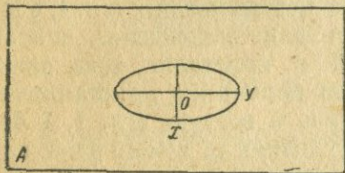


Рис. 34.

Таким образом вместо бесчисленного множества направлений возможных колебаний, имеющих место в изотропной среде, в кристалле (кроме кубической

сингонии), для каждого сечения мы будем иметь в общем случае лишь два таких направления — OX и OY . Следовательно, луч в кристалле поляризуется. Колебание OX , которому кристалл оказывает наименьшее сопротивление, будет распространяться быстрее, чем колебание OY . Следовательно, вместо одной световой волны мы будем иметь две, распространяющиеся с различной скоростью. Таким образом и поляризация и дупреломление света являются следствием анизотропии кристаллов.

§ 3. Оптическая индикатриса. Правило индикатрисы

В дальнейшем, при изучении оптических свойств кристаллов, мы будем пользоваться особой вспомогательной поверхностью, которая носит название оптической индикатрисы. Эта поверхность имеет форму эллипсоида. Каждый радиус-вектор индикатрисы своей величиной выражает показатель преломления кристалла для тех волн, колебания которых совершаются в направлении этого вектора.

Каждое сечение индикатрисы имеет форму эллипса (кроме рассматриваемых ниже частных случаев, когда сечение — круг). Из изложенного в предыдущем параграфе следует, что оси этого эллипса являются направлениями колебаний, возможных в данном сечении. В то же время величины этих осей выражают показатели преломления кристалла для соответствующих колебаний.

Необходимо помнить, что колебания совершаются перпендикулярно к направлению распространения световой волны. Следовательно, оси эллипса по своей величине и направлению отвечают показателям преломления и направлениям колебаний двух волн, распространяю-

щихся перпендикулярно к данному сечению индикатрисы. Или, наоборот, если известно направление световой нормали относительно индикатрисы, то, чтобы узнать направления колебаний и показатели преломления для волн, распространяющихся по этой нормали, надо через центр индикатрисы провести плоскость перпендикулярную к этой нормали. Оси полученного эллиптического сечения являются векторами, указывающими направления колебаний и показатели преломления для волн, распространяющихся по нормали к данному сечению.

Изложенное составляет содержание так называемого правила индикатрисы (В. Н. Лодочников). В дальнейшем постоянно придется пользоваться этим правилом.

§ 4. Геометрия оптической индикатрисы

Индикатриса любого кристалла представляет собой некоторый эллипсоид. Это будет либо эллипсоид с тремя неравными друг другу

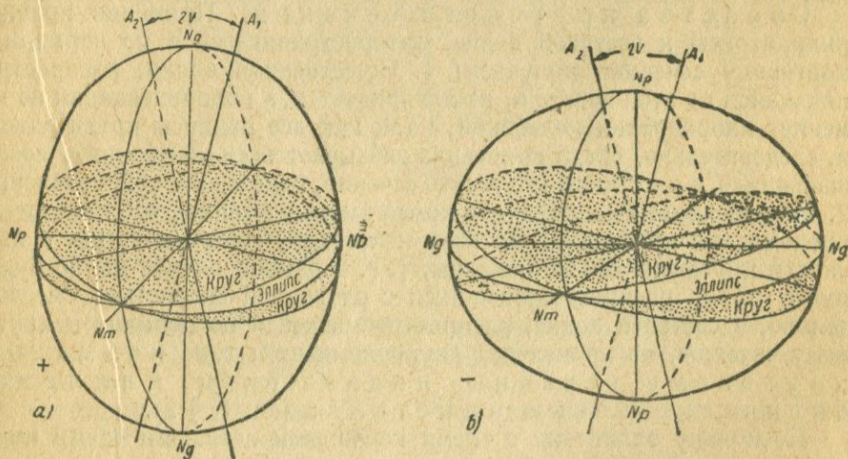


Рис. 35. Оптическая индикатриса двuosных кристаллов: а) — положительная; б) — отрицательная.

главными осями, либо эллипсоид вращения, либо, наконец, шар, который можно рассматривать как частный случай эллипсоида (если все три оси равны друг другу).

Индикатриса — эллипсоид с тремя неравными главными осями (рис. 35). Симметрия такого эллипсоида соответствует символу $с 3G_2 3P$, т. е. он имеет центр инверсии, три взаимно перпендикулярных оси второго порядка и три плоскости симметрии. Осями симметрии являются главные оси эллипсоида, меньшая из них обозначается n_p , средняя по величине n_m и наибольшая

шая n_g (n — показатель преломления, p , m и g — начальные буквы французских слов *petit* — малый, *moyen* — средний, *grand* — большой). Существуют и другие системы обозначений. В некоторых, главным образом старых работах эти оси обозначаются готическими буквами a , b , c . В США и Германии употребляется двойная система обозначений; n_p , n_m и n_g , как направления осей эллипсоида, обозначаются X , Y , Z . Соответствующие же этим осям величины показателей преломления обозначаются α , β , γ .

Плоскостями симметрии индикатрисы являются плоскости $n_p n_m$, $n_p n_g$ и $n_m n_g$. Иногда они называются главными плоскостями индикатрисы. Сечения эллипсоида вообще являются эллипсами, но можно показать, что два из них являются кругами. Рассекая эллипсоид плоскостями, проходящими через ось n_m , будем получать эллипсы, у каждого из которых одной осью будет ось n_m , а другой — какое-то направление в плоскости $n_g n_p$. Так как $n_g > n_m$, а $n_p < n_m$, то можно в плоскости $n_g n_p$ найти вектор, равный n_m . Проведя сечение через этот вектор и ось n_m , получаем эллипс, обе оси которого равны, т. е. окружность. Вследствие симметрии эллипсоида таких круговых сечений будет два.

Свойства кругового сечения. Применив правило индикатрисы к световой волне, распространяющейся по нормали к круговому сечению, получаем: 1. Естественная волна, распространяющаяся по этой нормали, не поляризуется, а поляризованная не изменяет направления колебаний,¹ так как все радиусы круга равны, и, следовательно, среда кристалла оказывает всем колебаниям, совершающимся в плоскости кругового сечения, одинаковое сопротивление. 2. Из равенства всех радиусов круга вытекает также, что показатели преломления кристалла для всех колебаний, совершающихся в плоскости кругового сечения, равны, т. е. в данном случае мы не будем иметь волн, распространяющихся с различной скоростью. Следовательно, в световой волне, распространяющейся по нормали к круговому сечению, не происходит дупреломления; т. е. нормаль к круговому сечению индикатрисы является оптической осью кристалла (гл. I, § 2).

Поскольку эллипсоид с тремя неравными главными осями имеет два круговых сечения, он служит индикатрисой для оптически-двуосных кристаллов.

Плоскость оптических осей, угол $2V$, оптический знак кристалла. Оптические оси, будучи нормальными к круговым сечениям, перпендикулярны к оси n_m , которая лежит в обоих круговых сечениях. Следовательно, оптические оси лежат в перпендикулярной к оси n_m плоскости $n_g n_p$. Поэтому плоскость $n_g n_p$ называется плоскостью оптических осей.

¹ Здесь мы не рассматриваем имеющее место в ряде веществ явление вращения плоскости поляризации. Это явление может наблюдаться лишь в довольно толстых кристаллических пластинках и вызывается особыми причинами, связанными с особой симметрией кристаллов некоторых веществ.

Оси n_g и n_p являются биссектрисами углов между оптическими осями. Одна из них делит пополам острый, а другая — тупой угол оптических осей. Угол между оптическими осями обычно обозначается $2V$. Если нет особой оговорки, подразумевается острый угол.

Ось индикатрисы, делящая пополам острый угол оптических осей, называется острой биссектрисой (О. Б.), а делящая тупой угол, называется тупой биссектрисой (Т. Б.).

Если острой биссектрисой является ось n_g , кристалл называется оптически положительным, если же острой биссектрисой служит ось n_p , то кристалл называется оптически отрицательным (рис. 36, *a* и *b*).

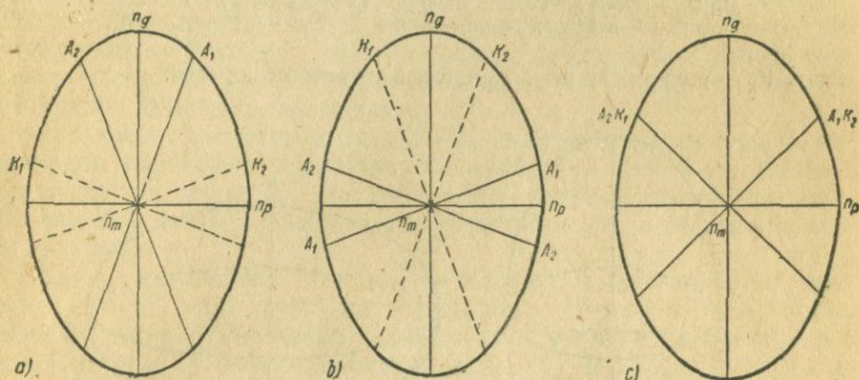


Рис. 36. Разрез индикатрисы по плоскости оптических осей: *a*) — положительного, *b*) — отрицательного, *c*) — нейтрального кристалла; A_1 и A_2 — оптические оси; K_1 и K_2 — соответствующие им круговые сечения.

Возможен частный случай, когда оптические оси перпендикулярны друг к другу. В этом случае оси n_g и n_p являются биссектрисами прямых углов.

Кристаллы, у которых $2V = 90^\circ$, называются оптически нейтральными (рис. 36, *c*).

Связь между формой индикатрисы, углом оптических осей и знаком кристалла. Положение оптических осей определяется положением круговых сечений. Круговое сечение проходит через ось n_m и радиус-вектор, лежащий в плоскости $n_g n_p$ и равный n_m по величине. Малый угол оптических осей свидетельствует о том, что круговые сечения лежат под малым углом к одной из главных плоскостей эллипсоида. Если кристалл положительный (острой биссектрисой служит ось n_g), круговые сечения лежат под малым углом к плоскости $n_p n_m$ (рис. 36, *a*), и, следовательно, оси n_m и n_p мало отличаются по величине друг от друга. Индикатриса по форме мало отличается от вытянутого эллипсоида вращения. Если кристалл отрицательный (острая биссектриса — n_p), круговые сечения делают малый угол с плоскостью $n_g n_m$ (рис. 36, *b*). В данном случае

ось n_m близка по величине к n_g и индикатриса по форме приближается к сплюснутому эллипсоиду вращения. Большой угол оптических осей ($2V$ около 90°) указывает на то, что круговые сечения делают примерно равные углы с плоскостями $n_m n_p$ и $n_m n_g$. В этом случае ось n_m по своей величине близка к среднему арифметическому между n_p и n_g и индикатриса представляет собой типичный эллипсоид с тремя неравными главными осями, не приближающийся по форме к эллипсоиду вращения.

Из уравнения эллипсоида могут быть выведены количественные соотношения между углом оптических осей и величинами n_p , n_m и n_g . Соотношения эти следующие:

$$\sin V_g = \frac{n_g}{n_m} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_p^2}{n_g^2 - n_p^2}} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} V_g = \frac{n_g}{n_p} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_p^2}{n_g^2 - n_m^2}}.$$

Здесь V_g — угол между осью n_g и одной из оптических осей.

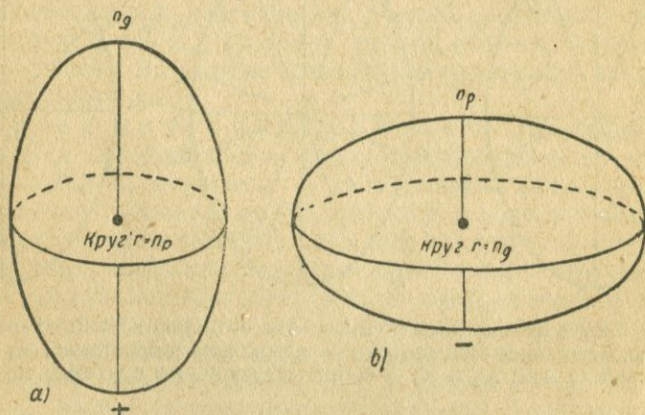


Рис. 37. Оптическая индикатриса одноосных кристаллов: а) — положительная; б) — отрицательная.

Для практических расчетов часто пользуются более простыми приближенными формулами:

$$\sin V_g \approx \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_p}} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} V_g \approx \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_m}}.$$

Из последней формулы видно, что для положительных кристаллов, у которых $V_g < 45^\circ$ и $\operatorname{tg} V_g < 1$, $n_m - n_p < n_g - n_m$, т. е. n_m ближе по величине к n_p , чем к n_g . Для отрицательных, у которых $V_g > 45^\circ$ и $\operatorname{tg} V_g > 1$, соотношение обратное.

Индикатриса — эллипсоид вращения (рис. 37). Такой эллипсоид имеет одну главную ось (ось вращения). Сечение, перпендикулярное к главной оси, есть окружность. Каждый радиус этой окружности является для эллипсоида осью симметрии второго порядка. Каждая плоскость, проведенная через главную ось, есть плоскость симметрии. Плоскостью симметрии является также плоскость,

перпендикулярная к главной оси. Симметрия эллипсоида вращения отвечает символу $c G_{\infty} \infty G_2 \infty P$.

Главная ось эллипсоида в то же время является оптической осью, так как она перпендикулярна к круговому сечению. Эллипсоид вращения имеет только одно круговое сечение и одну оптическую ось. Следовательно, он служит индикатрисой для одноосных кристаллов (гл. I, § 2).

Одноосные кристаллы могут рассматриваться как частный случай двuosных при $2V = 0^\circ$. Пусть мы имеем индикатрису двuosного положительного кристалла (О. Б. = n_g). Будем увеличивать ось n_p или уменьшать ось n_m . Сечение $n_m n_p$ будет приближаться по форме к окружности, а круговые сечения будут образовывать с сечением $n_m n_p$ все более острый угол. Соответственно оптические оси будут приближаться к оси n_g . В пределе, когда $n_p = n_m$, оба круговые сечения сольются с плоскостью $n_m n_p$, а обе оптические оси — с осью n_g . Получаем вытянутый эллипсоид вращения.

Аналогично, увеличивая ось n_m или уменьшая ось n_g , мы из индикатрисы двuosного отрицательного кристалла получим сплюснутый эллипсоид вращения. Это произойдет, когда n_g станет равно n_m , оба круговые сечения совпадут с плоскостью $n_m n_g$, а обе оптические оси — с осью n_p .

Отсюда естественно, что одноосные кристаллы называются положительными, когда индикатриса имеет форму вытянутого эллипсоида вращения, и отрицательными, когда индикатриса имеет форму сплюснутого эллипсоида вращения (рис. 37 + и —).

Показатель преломления одноосных кристаллов имеет два главных значения. Одно — соответствующее оси вращения и другое — диаметру кругового сечения. Меньшее из них будем, как и в двuosных кристаллах, обозначать n_p , а большее — n_g . Следовательно, в положительных кристаллах оптическая ось (ось вращения) есть ось n_g , а диаметр кругового сечения = n_p . В отрицательных, наоборот, оптическая ось = n_p , а диаметр кругового сечения = n_g . (Иногда диаметр кругового сечения обозначают n_m , а ось вращения, в зависимости от знака кристалла, n_g или n_p .)

Интересно сравнить, совпадает ли данное здесь определение положительных и отрицательных кристаллов с тем, которое было дано в I главе, исходя из волновой поверхности (§ 2). Выше мы нашли, что световой луч, распространяющийся по оптической оси, имеет в положительных кристаллах максимальную скорость, а в отрицательных — минимальную. Легко убедиться, что оптическая индикатриса дает то же самое. Пусть свет распространяется по оптической оси. По правилу индикатрисы рассекаем эллипсоид плоскостью перпендикулярной к этой оси. В сечении имеем круг, диаметр которого в положительных кристаллах равен n_p . Следовательно, кристалл для луча, распространяющегося по оптической оси, имеет наименьший показатель преломления, т. е. луч этот имеет наибольшую скорость. Аналогично — в отрицательных кристаллах имеем диаметр кругового сечения, равный n_g , что соответствует наименьшей скорости луча, идущего по оптической оси.

Индикатриса — шар. Любое сечение такой индикатрисы есть окружность, а значит, — любое направление является оптической осью. Нет направлений, распространяясь по которым, свет испытывал бы двупреломление. Следовательно, шар служит индикатрисой для тел оптически изотропных.

§ 5. Форма и положение оптической индикатрисы в кристаллах разных сингоний

Все свойства кристаллов, в том числе и оптические, подчиняются закону однородности, согласно которому свойства кристалла по всем направлениям, параллельным данному, тождественны. Поэтому безразлично, какую точку кристалла принять за центр оптической индикатрисы. Оптические оси и главные оси индикатрисы должны рассматриваться не как отдельные прямые линии, проходящие через какую-то определенную точку кристалла, а как направления.¹ В настоящем параграфе для удобства изложения мы будем принимать, что центр индикатрисы совпадает с геометрическим центром кристалла. Необходимо твердо помнить, что с таким же основанием мы можем поместить ее центр в любую другую точку. Важно лишь установить, с какими кристаллографическими направлениями совпадают те или иные направления индикатрисы.

Понятие о равных и единичных направлениях. В кристаллографии равными или симметрично-равными направлениями называются такие, которые выводятся друг из друга при помощи элементов симметрии данного кристалла. Пусть, например, кристалл имеет ось симметрии четвертого порядка. Возьмем любое направление, перпендикулярное к данной оси. Наличие оси симметрии предполагает повторяемость всех элементов кристалла при повороте вокруг этой оси на некоторый угол. Для G_4 этот угол равен 90° . Поэтому направление OA (рис. 38) имеет равные себе OA_1 , OA_2 и OA_3 . Из чертежа видно, что в данном случае OA и OA_2 так же, как и OA_1 и OA_3 представляют собой одно направление. Таким образом, благодаря наличию G_4 , перпендикулярное к ней направление AA_2 имеет равное себе направление A_1A_3 .

Плоскость симметрии позволяет из идущего косо к ней направления BB_1 получить симметрично равное B_2B_3 (рис. 39).

Понятие о равных направлениях имеет не только формально-геометрический, но и физический смысл. Частицы, из которых состоит кристалл, расположены вдоль равных направлений одинаковым образом. Поэтому по равным направлениям кристалл имеет одинаковые физические свойства.

Единичным называется направление в кристалле, не имеющее себе равных, т. е. такое, из которого при помощи элементов сим-

¹ Под направлением в кристаллографии понимается совокупность всех линий, параллельных данной.

метрии данного кристалла нельзя вывести никаких других направлений. Физические свойства кристалла по единичному направлению могут отличаться от свойств его по всем другим направлениям.

По числу единичных направлений сингонии кристаллов могут быть сгруппированы следующим образом:

1. Кубическая сингония — нет единичных направлений. Благодаря высокой симметрии кубических кристаллов, каждому направлению можно найти несколько равных.

2. Средние сингонии — тетрагональная, гексагональная, тригональная — имеется одно единичное направление, совпадающее с главной осью.

3. Низшие сингонии — имеется не менее трех единичных направлений. Каждая из низших сингоний характеризуется различным числом и расположением единичных направлений, а именно:

а. Ромбическая сингония — имеются три взаимно перпендикулярных единичных направления. Эти направления совпадают с осями

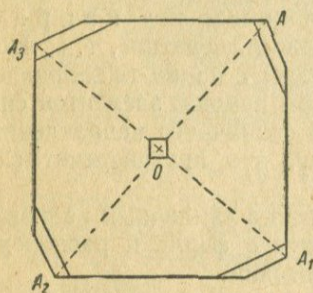


Рис. 38. G_4 перпендикулярна к плоскости чертежа. Направление AA_2 имеет равное себе направление $A_1 A_3$.

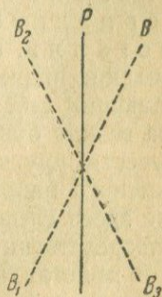


Рис. 39. P — плоскость симметрии, перпендикулярная к чертежу; BB_1 и B_2B_3 — симметрично равные направления, лежащие в плоскости чертежа.

симметрии второго порядка (в кристаллах с одной осью второго порядка и двумя плоскостями симметрии — одно из единичных направлений совпадает с осью, а два других расположены по нормальям и плоскостям).

б. Моноклинная сингония — имеется бесконечное множество единичных направлений, лежащих в одной плоскости. (В этой плоскости все направления единичны.) Кроме того, одно единичное направление расположено по нормали к этой плоскости. Плоскость единичных направлений совпадает с плоскостью симметрии моноклинного кристалла (или с плоскостью, нормальной к двойной оси в кристаллах без плоскости симметрии), а нормаль к плоскости единичных направлений — осью симметрии второго порядка (или с нормалью к плоскости симметрии в кристаллах, не имеющих двойной оси).

с. Триклинная сингония — все направления единичны. Вследствие отсутствия осей и плоскостей симметрии ни одно направление не имеет себе равных.

Рассмотрим теперь с точки зрения числа единичных направлений разные типы индикатрисы: 1) шар не имеет единичных направлений; 2) эллипсоид вращения имеет одно единичное направление, совпадающее с его осью вращения (оптической осью); 3) эллипсоид с тремя неравными главными осями имеет три единичных направления, совпадающие с его главными осями.

Анизотропия кристалла в отношении физических свойств есть следствие анизотропии его строения. Свойства кристалла по разным направлениям могут быть различны только в том случае, если расположение слагающих кристалл частиц по этим направлениям различно, т. е. если эти направления не являются равными.¹

Таким образом, симметрия кристалла в отношении физических, в данном случае оптических свойств никогда не может быть ниже симметрии его строения. Отсюда непосредственно следует, что единичное направление индикатрисы должно обязательно совпадать с единичным же направлением кристалла. Если предположить обратное, т. е. что единичное направление индикатрисы совпадает с каким-то направлением кристалла, имеющим себе равные, то при помощи элементов симметрии кристалла можно будет из данного единичного направления индикатрисы вывести другие равные ему, что противоречит самому понятию единичного направления.²

Выведенное здесь следствие о совпадении единичных направлений позволяет непосредственно сделать вывод о форме и расположении индикатрисы в кристаллах разных сингоний.

1. Кубическая сингония — нет единичных направлений. Следовательно, индикатриса не может иметь единичных направлений, т. е. должна иметь форму шара.

2. Средние сингонии — одно единичное направление. Следовательно, индикатриса не может иметь больше одного единичного направления, т. е. должна иметь форму эллипсоида вращения. Единичное направление индикатрисы — оптическая ось — должно совпадать с единичным направлением кристалла — главной осью симметрии.

Примечание. Условие, на которое мы опираемся, позволило сделать вывод о невозможности в кристаллах средних сингоний индикатрисы с числом единичных направлений больше одного. Однако отсюда не следует, что число единичных

¹ Обратное соотношение не всегда имеет место, т. е. физические свойства кристалла могут быть одинаковы и для некоторых неравных друг другу направлений.

² Симметрия кристалла определяет симметрию индикатрисы, но не наоборот. Поэтому в ряде случаев симметрия индикатрисы может быть выше симметрии кристалла, и равные направления индикатрисы могут совпадать с неравными друг другу направлениями кристалла.

направлений в индикатрисе этих кристаллов не может быть меньше одного, т. е. что индикатриса не может быть шаром. Поэтому индикатриса одноосных кристаллов может иногда очень мало отличаться от шара, а в некоторых частных случаях даже быть в точности шаром. Аналогично в кристаллах низших сингоний, в редких случаях, возможна индикатриса в виде эллипсоида вращения.

3. Низшие сингонии — кристалл имеет не меньше трех единичных направлений. Поэтому здесь возможна индикатриса в виде эллипсоида с тремя неравными осями.

Ориентировка индикатрисы в кристаллах низших сингоний. Зная, что единичные направления индикатрисы должны совпадать с единичными же направлениями кристалла, легко установить следующее;

а) Ромбическая сингония — главные оси индикатрисы совпадают с единичными направлениями кристалла, которыми в ромбической сингонии являются три оси симметрии второго порядка, или ось симметрии и нормали к двум плоскостям симметрии. По этим направлениям проводятся кристаллографические оси — $a[100]$, $b[010]$ и $c[001]$. Какая из осей индикатрисы (n_g , n_m , n_p) с какой именно из кристаллографических осей $[100]$, $[010]$, $[001]$ совпадает предвидеть заранее нельзя. Этот вопрос решается непосредственным наблюдением над кристаллами каждого данного вещества.

б) Моноклиная сингония — одна из осей индикатрисы совпадает с нормалью к плоскости единичных направлений. Эта нормаль всегда берется за вторую кристаллографическую ось $b[010]$, две другие оси индикатрисы расположены в плоскости единичных направлений.

Для каждого вещества характерно, во-первых, какая именно из осей индикатрисы совпадает с осью $[010]$ и, во-вторых, как расположены две другие оси индикатрисы. Эти оси, лежащие в плоскости второго пинакоида (010), не совпадают с какими-либо определенными кристаллографическими направлениями и образуют с ребрами кристалла углы, характерные для каждого данного вещества.

в) Триклинная сингония — поскольку все направления в триклинном кристалле единичны, положение индикатрисы не ограничено никакими заранее определенными условиями. Оси n_g , n_m и n_p расположены косо относительно ребер кристалла и образуют с ними углы, величины которых характерны для каждого данного вещества.

Примечание. В настоящей главе мы не касались вопроса о дисперсии главных осей индикатрисы, которая состоит в том, что оси индикатрисы в одном и том же кристалле занимают несколько различное положение для лучей разного цвета. Эта дисперсия возможна для осей, положение которых не обусловлено элементами симметрии кристалла, т. е. для двух осей в моноклинных и для всех трех осей в триклинных кристаллах.

Вопрос о дисперсии осей индикатрисы, а также и о других видах дисперсии, возможных в кристаллах, будет разобран ниже.

Глава V

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ ПОД МИКРОСКОПОМ. ХАРАКТЕР ПОГАСАНИЯ КРИСТАЛЛОВ РАЗНЫХ СИНГОНИЙ. ПОГАСАНИЕ ДВОЙНИКОВ

§ 1. Измерение углов между ребрами кристалла

Ограниченный кристалл под микроскопом представляется в виде контура, ограниченного прямыми линиями. Углы между этими линиями могут быть измерены.

Углы между ребрами, оконтуривающими кристалл, имеют диагностическое значение главным образом при исследовании продуктов химических реакций, производимых на предметном стекле. Выпадающие при этом кристаллы ложатся на стекло своей наиболее развитой гранью. Углы между ребрами, окаймляющими эту грань, в ряде случаев являются константами, характерными для вещества.

В петрографических шлифах углы между линиями, оконтуривающими кристалл, имеют меньшее диагностическое значение, так как эти углы меняются в зависимости от ориентировки кристалла относительно плоскости шлифа. В случае одноосных кристаллов следует обращать внимание в шлифе на форму контура в разрезе перпендикулярном к оптической оси. По этому контуру в благоприятных случаях можно установить, относится ли кристалл к тетрагональной или к гексагональной сингонии.

Измерение угла между линиями под микроскопом производится следующим образом:

- 1) центрируют микроскоп;
- 2) передвигая препарат, помещают вершину измеряемого угла в центр поля зрения или, лучше, на очень небольшом расстоянии от центра поля;
- 3) вращая столик, ставят одну сторону измеряемого угла по возможности параллельно какой-либо из нитей окулярного креста — рис. 40, *a* (достигнув этого, делают отсчет по лимбу столика микроскопа);
- 4) вращая столик, ставят вторую сторону измеряемого угла параллельно тому же концу той же нити окулярного креста — рис. 40, *b* (снова делают отсчет по лимбу столика);
- 5) искомый угол равен разности отсчетов.

Если на том же кристалле необходимо измерить еще один угол, препарат передвигают так, чтобы вершина этого угла оказалась в центре, и производят измерение указанным выше способом (рис. 40, *c* и *d*)

Практические замечания. Точность измерения угла при аккуратной работе составляет 20'—30'. Достижение такой точности возможно, если контуры кристалла имеют вид тонких прямых линий. Если кристалл сливается с фоном, что бывает, когда его показатель преломления близок к показателю преломления среды, в которой он находится, следует несколько уменьшить отверстие диафрагмы осветительного аппарата. При этом контуры кристалла выступают

более резко. При чрезмерном диафрагмировании на краях кристалла появляется более или менее широкая темная кайма, отрицательно влияющая на точность измерения.

Вершину угла выгоднее ставить не в самый центр, а очень близко от него. Если вершина угла находится в центре, то ребро при установке параллельно нити совпадает с ней. При этом погрешность в установке ребра, равная толщине нити, не может быть замечена. Если ребро помещено параллельно нити, на очень малом от нее расстоянии, глаз довольно точно улавливает, на всем ли протяжении ребра расстояние от нити одинаково. Само собой понятно, что чем длиннее ребро, тем точнее производится эта установка. Поэтому мелкие кристаллы измеряются при большом увеличении.

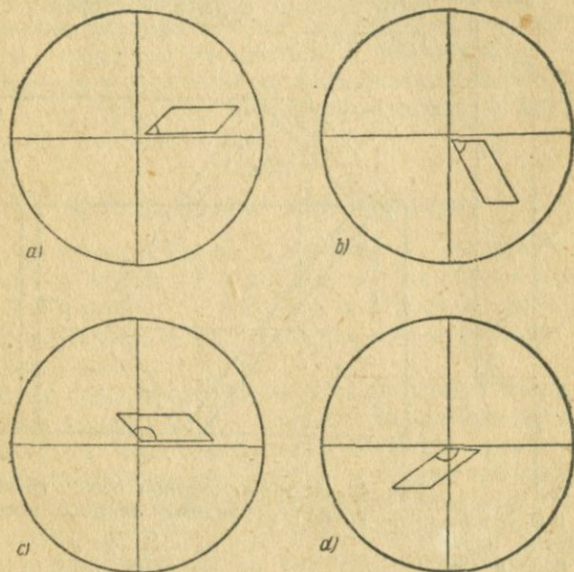


Рис. 40. Измерение углов на кристалле медного купороса: а) и б) — измерение острого угла; в) и д) — измерение тупого угла.

Точность центрировки должна быть такова, чтобы вершина угла при вращении столика не уходила далеко от центра поля зрения. В противном случае по крайней мере одно из ребер придется устанавливать параллельно нити на большом от нее расстоянии, что, естественно, вредно влияет на точность установки.

При измерении тупого угла иногда бывает удобнее совмещать второе ребро не с тем же концом нити, что и первое, а с противоположным. Получаемый при этом угол является дополнением до 180° к искомому. Если одно ребро совмещать с одной нитью, а другое ребро с другой нитью окулярного креста, получаемый результат, в зависимости от направления поворота, представляет либо $90^\circ - \alpha$, либо $90^\circ + \alpha$, где α — искомый угол. Такой способ измерения рекомендован быть не может, так как при нем к погрешности самого измерения прибавляется (если она имеет место) погрешность от неточной перпендикулярности друг к другу нитей креста.

§ 2. Измерение угла спайности

В процессе изготовления шлифа кристаллы испытывают тангенциальные натяжения и при неосторожном шлифовании могут даже разорваться. Если кристаллы обладают спайностью, то даже слабые натяжения вызывают появление трещин по плоскости спайности. Под микроскопом такие трещины имеют вид серии более или менее тонких параллельных прямых линий. Чем совершеннее спайность, тем больше появляется таких линий, тем длиннее и прямее они. В специальных руководствах по методам петрографических исследований иногда даются указания, как по характеру трещин судить о степени совершенства спайности.¹

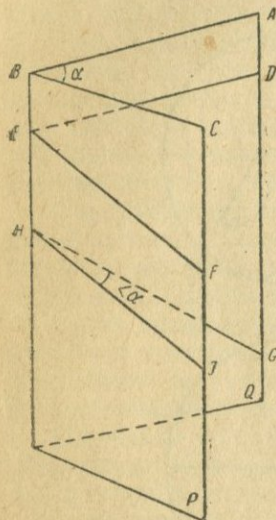


Рис. 41. P и Q — плоскости спайности, пересекающиеся под углом α . Если плоскость шлифа перпендикулярна к этим плоскостям, наблюдаем $\angle ABC = \alpha$. В иных случаях наблюдаем $\angle DEF > \alpha$ или $\angle GHI < \alpha$.

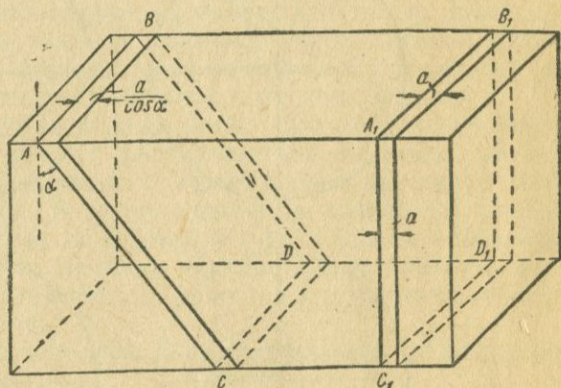


Рис. 42. Истинная ширина обеих трещин одна и та же, равная a ; видимая ширина косо́й трещины = $\frac{a}{\cos \alpha} > a$.

При опускании тубуса, вместо верхнего края косо́й трещины AB , увидим нижний — CD , лежащий в стороне; при этом будет казаться, что трещина смещается... У вертикальной трещины, соответственно, вместо A_1B_1 увидим край C_1D_1 , лежащий точно под A_1B_1 — трещина не смещается.

В случае спайности по двум или нескольким плоскостям, под микроскопом видны пересекающиеся между собой системы трещин, параллельных этим плоскостям. Угол между плоскостями спайности служит важным диагностическим признаком при определении минералов. Измерение этого угла производится так же, как и измерение угла между ребрами, описанное в предыдущем параграфе. При этом необходимо иметь в виду, что угол между трещинами только тогда равен углу меж-

¹ В иммерсионных (порошковых) препаратах трещины спайности обычно на зернах отсутствуют. Приемы изучения характера спайности для таких препаратов будут даны ниже (гл. XXV).

ду плоскостями спайности, когда обе эти плоскости перпендикулярны к поверхности шлифа. Если шлиф рассекает кристалл косо к этим плоскостям, угол между трещинами может быть или больше или меньше истинного угла (рис. 41), а в некоторых случаях, например, если одна из плоскостей спайности параллельна плоскости шлифа, мы видим систему трещин, параллельных только одному направлению. Поэтому, приступая к измерению угла спайности, необходимо из ряда зерен данного минерала, рассеянных в шлифе, выбрать зерно, в котором плоскости спайности расположены вертикально. Вертикальные трещины узнаются по следующим признакам:

1. Они кажутся более узкими, чем косые (рис. 42).

2. Если при большом увеличении поднимать и опускать тубус микроскопа (микрометренным винтом), вертикальные трещины остаются неподвижными, косые же смещаются в сторону (рис. 42).

Ряд практически и теоретически интересных деталей, относящихся к измерению угла спайности минералов в шлифах, читатель найдет в руководстве В. Н. Лодочникова.¹

§ 3. Измерение угла погасания

Углом погасания данного сечения называется угол между одним из направлений колебаний данного сечения и каким-либо из кристаллографических элементов (следом грани, трещиной спайности и пр.).

Для одного и того же минерала углы погасания будут различны в зависимости от сечения и от того, между какими именно направлениями измеряется угол. Часто требуется установить только характер погасания минерала (прямое или косое); в тех же случаях, когда угол погасания имеет диагностическое значение (например, при определении плагиоклазов, пироксенов, амфиболов и пр.), точно указывается, в каких именно разрезах и между какими направлениями следует этот угол измерять.

Для измерения угла погасания берут отсчеты по лимбу столика при двух его положениях. Первое положение — в момент погасания зерна. При этом направления колебаний в кристалле совпадают с нитями окулярного креста (рис. 43, а). Второе положение, когда кристаллографическое направление, относительно которого желают измерить угол, расположено параллельно одной из нитей (рис. 43, б). Разность отсчетов дает угол между одним из направлений колебаний и данным кристаллографическим направлением.

Практические замечания. Установка ребра параллельно нити при аккуратной работе, как указывалось выше, возможна с точностью до 20—30'. Точность установки кристалла на погасание зависит от многих причин и различна для разных кристаллов. Для точной работы поляризационная система микроскопа должна быть юстирована (колебания николей взаимно перпендикулярны и

¹ В. Н. Лодочников, Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества, Госхимтехиздат, 1932, §§ 98—100.

совпадают с нитями). Освещение должно быть по возможности сильным, а диафрагма осветительного аппарата несколько прикрыта для придания большей параллельности световым лучам.

Погасание кристалла происходит постепенно. Кристалл кажется совершенно темным не только когда направления колебаний в нем точно параллельны колебаниям в николях, но и тогда, когда образуют с ними небольшой угол. Поэтому рекомендуется определять момент погасания, как среднее из двух отсчетов, а именно: поставить зерно на погасание, вращая столик, например, по часовой стрелке — 1-й отсчет, затем повернуть столик дальше в том же направлении до просветления зерна и обратно до погасания — 2-й отсчет. Погрешность полученного среднего составляет в разных случаях от $0^{\circ}30'$ до $1^{\circ}30'$.

Точность определения может быть несколько повышена при помощи следующего приема. Найдя среднее положение погасания, поворачиваем один из николей в обе стороны на небольшой угол ($\pm 2^{\circ}$). Если положение погасания определено точно, кристалл и окружающее его поле просветляются в одинаковой степени. В противном случае при повороте николя в одну сторону кри-

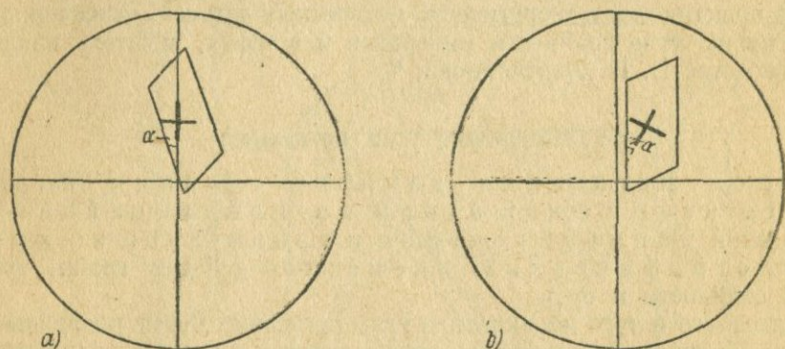


Рис. 43. *a)* — кристалл на погасании; направления колебаний параллельны нитям; *b)* — длинное ребро кристалла параллельно вертикальной нити. Разность отсчетов дает $\angle \alpha$ между длинным ребром кристалла и тем направлением, которое в момент погасания совпадало с вертикальной нитью.

сталл будет казаться темнее, а при повороте в другую — светлее поля. Такая проверка позволяет повысить точность установки на погасание примерно в 3 раза (в разных случаях до $10-30'$).

В подробных руководствах описываются различные приспособления, с помощью которых момент погасания может быть определен еще точнее. Для практической работы вполне достаточна точность, достигаемая изложенными выше методами.

§ 4. Характер погасания кристаллов средних сингоний

На кристаллах средних сингоний всегда присутствуют и, как правило, наиболее развиты грани одной или нескольких из следующих простых форм:

1. Пинакоид или моноэдр — грань перпендикулярна к главной оси симметрии кристалла, а следовательно и к оптической оси.
2. Призмы — грани параллельны главной оси симметрии кристалла (оптической оси).

3. Ромбоэдр, тетрагональный тетраэдр, тетрагональные, тригональные и гексагональные пирамиды и дипирамиды — грани наклонены к главной оси симметрии (оптической оси).

4. Кроме этих простых форм, на кристаллах средних сингоний возможны дитетрагональные, дитригональные и дигексагональные пирамиды и дипирамиды, скаленоэдры и трапецоэдры. Эти простые формы в кристаллооптической практике встречаются редко. Если они и развиваются на кристаллах, то в огромном большинстве случаев значительно уступают по своей величине граням перечисленных выше трех категорий.

В иммерсионных препаратах ограненные микроскопические кристаллы обычно ложатся на предметное стекло одной из наиболее развитых граней. Другие грани образуют контур кристалла. При этом возможны следующие случаи:

1. Кристалл лежит на грани пинакоида (или моноэдра) — оптическая ось перпендикулярна к столику микроскопа. Сечение индикатрисы, соответствующее данному разрезу, есть круг. В скрещенных николях такой кристалл при вращении столика будет все время оставаться темным. В этом случае по симметрии контура кристалла можно судить о сингонии.

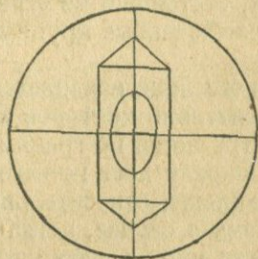


Рис. 44. Одноосный кристалл, лежащий на грани призмы. Погасание относительно контуров призмы прямое; относительно контуров дипирамиды — симметричное (циркон).

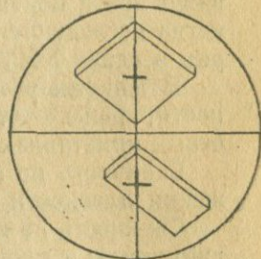


Рис. 45. Выколки по спайности кальцита (ромбоэдр). Погасание симметричное.

2. Кристалл лежит на грани призмы. Другие грани призмы участвуют в образовании контура кристалла. Оптическая ось параллельна столику микроскопа (рис. 44). Сечение индикатрисы, параллельное плоскости столика, в данном случае представляет собой эллипс. Одна из осей данного эллипса совпадает с оптической осью и параллельна ребрам призмы, другая — им перпендикулярна. Погасание всегда прямое.

Если на кристалле, кроме призмы, присутствуют грани пирамиды или дипирамиды, относительно последних будет иметь место так называемое симметричное погасание. Погасание называется симметричным, когда колебания совершаются по биссектрисам углов между ребрами. Признаком симметричного погасания служит равенство углов погасания для данного направления колебаний относительно двух смежных ребер, между которыми оно заключено.

3. Кристалл лежит на грани одной из форм третьей категории. Другие грани этой формы участвуют в образовании контура. Оптическая ось расположена косо к плоскости столика. Сечение индикатрисы, соответствующее данному разрезу, есть эллипс. Погасание относительно контуров призмы прямое; относительно контуров пирамиды — симметричное.

трысы, параллельное плоскости столика, имеет форму эллипса. Оси эллипса располагаются по биссектрисам углов между ребрами контура. Погасание симметричное (рис. 45).¹

4. Косое погасание в одноосных кристаллах может иметь место в том случае, когда кристалл покрыт гранями какой-либо формы четвертой категории и лежит на одной из этих граней. В кристаллооптической практике этот случай редок, поэтому резюмируем так:

Кристаллы средних сингоний обладают, как правило, прямым или симметричным погасанием.

Здесь мы рассмотрели случай, когда объект исследования представляет собой порошок, состоящий из ограненных кристаллов. Случай, когда исследуются измельченные крупные кристаллы, будет рассмотрен в главе XXV.

В шлифах угол погасания измеряется относительно трещин спайности, реже — относительно контуров кристалла. Спайность в одноосных кристаллах встречается по граням первых трех категорий.

Спайность по пинакоиду дает прямое погасание при любом положении плоскости спайности относительно плоскости шлифа.

Спайность по призме в случае, когда плоскости спайности перпендикулярны к плоскости шлифа, дает прямое погасание. Если плоскости спайности расположены наклонно, возможно и косое погасание. Спайность по ромбоэдру дает симметричное погасание в разрезе, перпендикулярном к плоскостям спайности. При наклонном положении плоскостей спайности возможно и косое погасание.²

§ 5. Характер погасания кристаллов ромбической сингонии

В ромбических кристаллах следует различать три категории простых форм.

1. Пинакоиды — каждая грань нормальна к одной из главных осей индикатрисы (и параллельна двум другим осям).

2. Призмы — каждая грань параллельна одной из главных осей индикатрисы.

3. Ромбические пирамиды, дипирамиды, тетраэдры и диэдры — расположены косо относительно осей индикатрисы.

Возможны следующие случаи:

1. Кристалл лежит на грани пинакоида (две главные оси индикатрисы расположены в плоскости препарата). Погасание относительно граней двух других пинакоидов будет прямым. Погасание относительно граней призм, оси которых расположены горизонтально, также будет прямым. Грани вертикальной призмы будут давать симметричное погасание. (Вертикальной будем называть призму, ось которой пер-

¹ Если почему-либо кристалл лежит не вполне горизонтально (например, опираясь на соседний кристалл), может быть косое погасание.

² Подробности о характере погасания кристаллов в шлифах см. в указанном выше руководстве В. Н. Лодочникова.

пендикулярна к плоскости столика микроскопа.) Грани дипирамиды и пирамиды также дают симметричное погасание (рис. 46, *a—d*).

2. Кристалл лежит на грани призмы. (Одна из главных осей индикатрисы лежит в плоскости препарата и параллельна оси призмы.) Погасание относительно других граней этой призмы и других призм

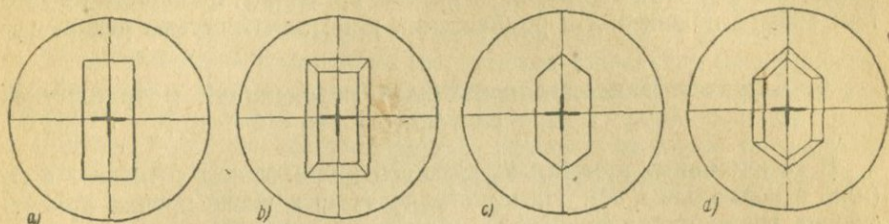


Рис. 46. Ромбический кристалл, лежащий на грани пинакоида. Контур образован: *a*) — двумя пинакоидами; *b*) — двумя горизонтальными призмами; *c*) — вертикальной призмой и пинакоидом; *d*) — ромбической дипирамидой и горизонтальной призмой.

того же пояса, а также относительно граней пинакоидов будет прямым. Другие формы могут давать косое погасание. Если кристалл лежит на грани призмы, другие грани той же призмы будут обязательно присутствовать на кристалле. Следовательно, при данной ориентировке кристалла всегда имеются наряду с прочими ребра, относительно которых погасание прямое (рис. 47, *a—c*).

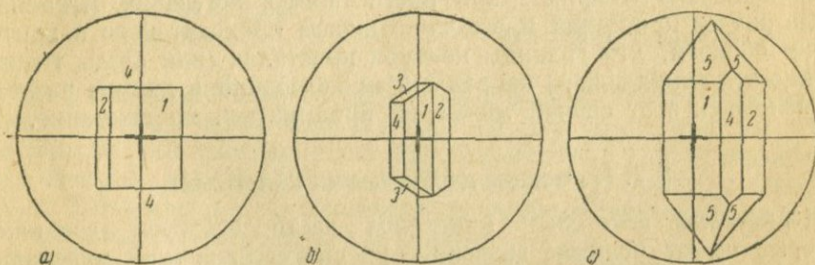


Рис. 47. Ромбический кристалл, лежащий на грани призмы: 1 — горизонтальная грань призмы; 2 — наклонная грань той же призмы; 3 — грани другой призмы; 4 — пинакоид; 5 — ромбическая дипирамида.

3. Кристалл лежит на косой грани — погасание, как правило, косое (на грани тетраэдра и диэдра может быть и прямое).

Принимая во внимание, что последняя ориентировка кристаллов встречается сравнительно редко, резюмируем так: кристаллы ромбической сингонии в большинстве случаев обнаруживают прямое или симметричное погасание.

В шлифах спайность по пинакoidу при вертикальном положении трещин дает прямое погасание. При косом положении трещин возможно косое погасание. Спайность по призме дает симметричное погасание при условии, что обе системы трещин, параллельные граням данной призмы, стоят вертикально. При косом положении трещин возможно косое, а в некоторых случаях — прямое погасание. Спайность по граням общего положения в ромбических кристаллах весьма редка.

§ 6. Характер погасания кристаллов моноклинной и триклинной сингонии

В моноклинных кристаллах одна ось индикатрисы совпадает с G_2 (или с нормалью к P). На кристалле часто в числе прочих присутствуют грани параллельные G_2 (или нормали к P).

Если кристалл лежит на одной из граней параллельных G_2 (или перпендикулярных к P) погасание прямое или симметричное. Во всех других случаях погасание косое. Угол погасания почти максимален, когда кристалл лежит на грани $\{010\}$, перпендикулярной к G_2 (или параллельной P). В этом случае колебания совершаются по направлениям двух главных осей индикатрисы, лежащих в плоскости единичных направлений кристалла.

В кристаллах триклинной сингонии нет ребер, параллельных осям индикатрисы, поэтому триклинный кристалл, лежащий на любой из своих граней, обнаруживает косое погасание. В петрографических шлифах в редких случаях возможно и прямое или почти прямое погасание. А именно, когда разрез кристалла плоскостью шлифа проходит косо и притом таким образом, что границы контура кристалла (или следы трещин спайности) параллельны направлениям колебаний в данном разрезе. Практически этот случай может не приниматься во внимание.

§ 7. Погасание двойниковых кристаллов

Кристаллы некоторых минералов часто образуют двойники, которые имеют большое значение при диагностике этих минералов. Как известно из кристаллографии, двойником называется закономерный сросток двух кристаллических индивидов, в котором один индивид выводится из другого либо путем отражения в некоторой плоскости, либо путем поворота вокруг некоторого направления на 180° (рис. 48). Плоскость, при отражении в которой из одного индивида двойника выводится другой, называется двойниковой плоскостью. Направление, при повороте вокруг которого на 180° из данного индивида двойника выводится другой, называется двойниковой осью.

Таким образом, двойниковая плоскость является для двойника плоскостью симметрии, а двойниковая ось — осью симметрии второго порядка. В отношении оптических свойств двойник всегда обладает

и двойниковой осью и двойниковой плоскостью, так как в отношении этих свойств все кристаллы можно рассматривать как имеющие центр инверсии. Из кристаллографии же известно, что взаимодействие центра инверсии с осью второго порядка вызывает существование плоскости симметрии, перпендикулярной к этой оси, и наоборот, взаимодействие центра инверсии с плоскостью симметрии влечет за собой появление оси второго порядка, перпендикулярной к плоскости.

От двойниковой плоскости надо отличать плоскость (поверхность) срастания или, иначе, двойниковый шов. Так называется поверхность, по которой два индивида двойника соприкасаются друг с другом. Эта поверхность во многих случаях является плоскостью и часто, но далеко не всегда, совпадает с двойниковой плоскостью.

Полисинтетическим двойником называется двой-

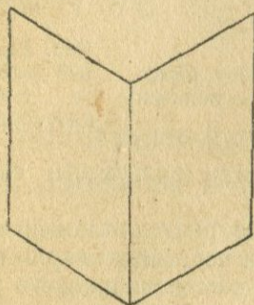


Рис. 48. Схема двойника гипса.

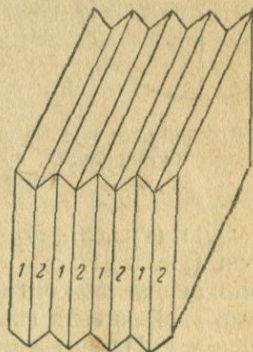


Рис. 49. Схема полисинтетического двойника.

ник, состоящий из большого числа (три и больше) тонких пластинок, ориентированных через одну параллельно друг другу (рис. 49). Таким образом, все нечетные пластинки принадлежат одному индивиду, а все четные — другому. Такие двойники особенно часты у плаггиоклазов. Возможны и более сложные двойниковые образования, на которых здесь мы останавливаться не будем.

Оптически двойники могут быть обнаружены по различной ориентровке обоих индивидов относительно плоскости препарата и, следовательно, по их разновременному погасанию. В то время, когда направления колебаний одного индивида приведены в совпадение с направлениями колебаний николей и он находится на погасании, для другого индивида это совпадение может не иметь места и он кажется светлым (рис. 50). Если, наоборот, добиться погасания второго индивида, просветляется первый.

Следует иметь в виду, что не всякий двойник может быть обнаружен оптически путем. Если двойниковая ось совпадает с одной из осей симметрии индикатрисы, то индикатриса после поворота на 180° вокруг этой оси совмещается со своим первоначальным положением, и направления колебаний в обоих индивидах двойника совпадают.

Двойник в этом случае оптически ведет себя как одиночный кристалл. Поэтому, например, в одноосных кристаллах оптически неразличимы двойники, у которых двойниковая ось совпадает с главной осью симметрии кристалла или перпендикулярна к ней. Оптически распознаются только те двойники, у которых двойниковая ось расположена косо

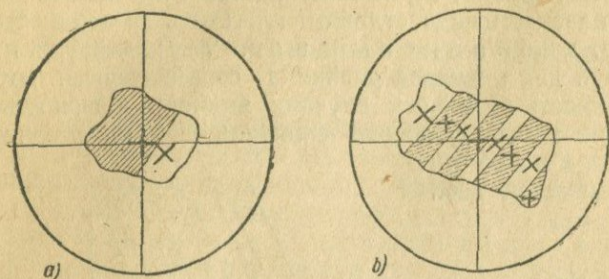


Рис. 50. Двойники под микроскопом в момент погасания одного из индивидов: *a)* — острый; *b)* — полисинтетический.

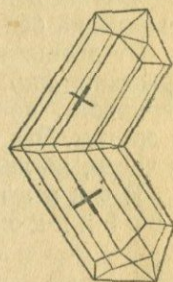


Рис. 51. Колончатый двойник рутила (двойниковая плоскость — 101).

относительно оси симметрии (или нормали к плоскости симметрии) кристалла (рис. 51).

Двойник ведет себя оптически как монокристалл также и в том случае, когда двойниковая ось расположена перпендикулярно к плоскости препарата. Направления колебаний обоих индивидов в этом разрезе повернуты друг относительно друга на 180° , т. е. параллельны

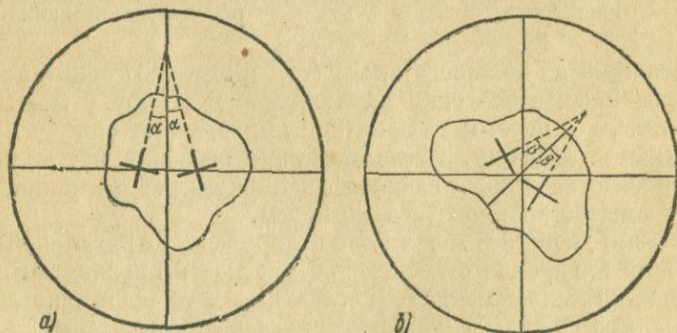


Рис. 52. Двойник, двойниковая плоскость которого перпендикулярна к плоскости столика микроскопа.

друг другу. Если двойниковая ось лежит в плоскости препарата, а, следовательно, двойниковая плоскость расположена вертикально, направления колебаний в обоих индивидах будут зеркально симметричны друг относительно друга. Если при этом двойниковая плоскость совпадает с плоскостью срастания, можно наблюдать симметричное погасание обоих индивидов двойника относительно этой плоскости (рис. 52, *a)*).

Из этого же рисунка видно, что в тот момент, когда двойниковая плоскость расположена параллельно колебаниям одного из николей, оба индивида двойника освещены одинаково, так как направления колебаний в обоих индивидах находятся под одинаковыми углами к направлениям колебаний в николях.

То же самое будет иметь место при повороте столика микроскопа на 45° от этого положения (рис. 52, *b*).

При наклонном положении двойниковой плоскости в общем случае двойники дают несимметричное погасание.

Наблюдения над двойниками играют большую роль при определении полевых шпатов, поэтому большое внимание уделяется двойникам в руководствах по методам петрографических исследований. Полное исследование двойников под микроскопом возможно только при помощи Федоровского метода, излагаемого в специальных руководствах (см. гл. XV).

Глава VI

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ ОКРАСКА КРИСТАЛЛОВ

§ 1. Понятие об интерференции монохроматического света

Если два луча, вышедшие из одной светящейся точки и прошедшие несколько различные пути, свести вместе и заставить двигаться по одному направлению, имеет место явление, называемое *и н т е р ф е р е н ц и е й*. Заключается оно в сложении колебательных движений, соответствующих обоим лучам. Результирующее колебательное движение может иметь амплитуду либо большую, чем каждое из первоначальных, либо меньшую в соответствии с тем, совпадают ли сходные или несходные части волн. В частном случае эта амплитуда может равняться нулю, т. е. интерферирующие лучи могут уничтожить друг друга.

Интерферировать могут лишь лучи одинаковой длины волны.

Разберем возможные случаи интерференции двух монохроматических лучей, поляризованных в одной плоскости. Пусть два луча, пути которых были несколько различны, соединяются в точке *A* и дальше продолжают путь по направлению *AB*. Разницу в длине путей, пройденных обоими лучами до их встречи в точке *A*, будем называть *р а з н о с т ь ю х о д а* (более строгое определение разности хода будет дано ниже).

1. Если разность хода лучей равна целому числу волн данного монохроматического света ($\Delta = n\lambda$), оба луча придут в точку *A* в одинаковой фазе. В каждой точке прямой *AB* фазы колебаний обоих лучей будут одинаковы. На рис. 53, *a* кривые 1 и 2 представляют синусоиды колебаний каждого из этих лучей в отдельности. Из рисунка видно, что оба колебания в каждой точке действуют в одну и ту же сторону. Общее смещение в каждой точке равно сумме смещений, которые имели бы место под воздействием каждого из колебаний в отдельности.

В результате вместо двух колебательных движений 1 и 2 будем иметь одно суммарное движение 3, амплитуда которого равна сумме амплитуд колебаний 1 и 2 ($A_3 = A_1 + A_2$).

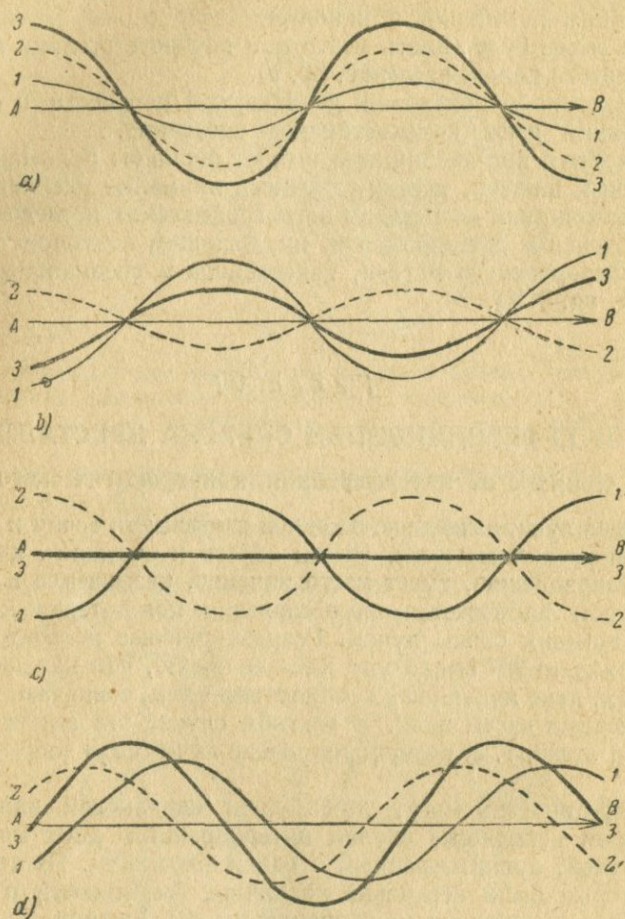


Рис. 53. Интерференция: а) $\Delta = n\lambda = 2n \frac{\lambda}{2}$; б) $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$; в) то же (амплитуды интерферирующих колебаний равны); д) $2n \frac{\lambda}{2} < \Delta < (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$; (1 и 2 — интерферирующие колебания, 3 — результирующее колебание.)

2. Если разность хода равна целому числу волн + полволны (или, что то же самое, нечетному числу полуволн), т. е. $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2} =$

$= (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$, колебания встречаются в точке A в противоположных фазах. В каждой точке прямой AB колебания 1 и 2 направлены в противоположные стороны и взаимно ослабляют друг друга. Амплитуда результирующего колебательного движения 3 равна разности амплитуд колебаний 1 и 2 ($A_3 = A_1 - A_2$; рис. 53, b). В частном случае, когда амплитуды интерферирующих лучей равны между собой, результирующая амплитуда равна нулю; взаимодействие двух световых лучей дает темноту (рис. 53, c).

3. Если разность хода не равна целому числу полувольт, амплитуда результирующего колебания имеет значение промежуточное между суммой и разностью амплитуд интерферирующих лучей (рис. 53, d).

§ 2. Разность хода в кристаллах

Две световые волны, на которые разбивается волна, входящая в кристалл, имеют при выходе из кристалла некоторую разность хода. Эта разность хода получается даже в том случае, если обе волны в кристалле прошли один и тот же путь. Можно показать, что эта разность хода получается вследствие различной скорости обеих волн.

Пусть световой луч, имеющий в пустоте скорость v_0 , длину волны λ_0 и период колебания T , входит в кристалл и распадается на два луча, обладающие скоростями v_1 и v_2 . Исходя из § 2 (стр. 8), можем написать:

$$v_0 = \frac{\lambda_0}{T}; \quad v_1 = \frac{\lambda_1}{T}; \quad v_2 = \frac{\lambda_2}{T}.$$

(При переходе света из одной среды в другую период колебания не меняется, а длина волны изменяется пропорционально скорости.) Условимся, что $v_1 < v_2$, тогда и $\lambda_1 < \lambda_2$.

Разделив выражение для v_0 на выражения для v_1 и v_2 , получаем соответственно показатели преломления для обоих лучей

$$n_1 = \frac{v_0}{v_1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1}; \quad n_2 = \frac{v_0}{v_2} = \frac{\lambda_0}{\lambda_2}.$$

Оба луча проходят в кристалле геометрически один и тот же путь, равный толщине кристалла d .

Но число волн K , уложившихся на этом пути, для обоих лучей различно:

$$K_1 = \frac{d}{\lambda_1} > K_2 = \frac{d}{\lambda_2}; \quad d = K_1 \lambda_1 = K_2 \lambda_2.$$

За время, равное $K_2 T$, луч второй пройдет всю толщину кристалла $K_2 \lambda_2$. За это же время первый луч, более медленный, пройдет путь, равный $K_2 \lambda_1$ и отстанет от второго луча на $(K_1 - K_2) \lambda_1$ (рис. 54). Пока первый луч будет проходить в кристалле этот участок, луч второй, распространяясь уже в воздухе, пройдет $(K_1 - K_2) \lambda_0$.

Дальше оба луча будут распространяться в воздухе с одной и той же скоростью, причем луч второй окажется впереди на отрезок $(K_1 - K_2)\lambda_0$, который и будет в данном случае разностью хода:

$$\Delta = (K_1 - K_2)\lambda_0.$$

Заменим K_1 и K_2 через $\frac{d}{\lambda_1}$ и $\frac{d}{\lambda_2}$:

$$\Delta = \left(\frac{d}{\lambda_1} - \frac{d}{\lambda_2}\right)\lambda_0 = d \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{\lambda_0}{\lambda_2}\right) = d(n_1 - n_2).$$

Сокращательно: $\Delta = d(n_1 - n_2)$.

Эта весьма важная формула показывает, что разность хода, производимая кристаллом, прямо пропорциональна его толщине и разности показателей преломления для волн, колебания которых совершаются в данном сечении кристалла.

Разность между показателями преломления для двух волн, распространяющихся по нормали к какому-либо сечению кристалла, называется силой двупреломления данного сечения.

Формула $\Delta = d(n_1 - n_2)$ получается непосредственно, если принять более строгое определение разности хода, по которому она равна разности не геометрических, а оптических путей волн. Под оптическим путем понимается геометрический путь, умноженный на показатель преломления среды для данной волны. Оптические пути волн λ_1 и λ_2 равны соответственно dn_1 и dn_2 , а разность хода

$$\Delta = dn_1 - dn_2 = d(n_1 - n_2).$$

§ 3. Интерференция при параллельных и скрещенных николях

Лучи в кристалле колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях и не интерферируют. Интерференция становится возможной после сведения этих колебаний в одну плоскость при помощи анализатора. Условия интерференции при параллельных и скрещенных николях различны.

1. При параллельных николях (рис. 55). Колебание с амплитудой OP разлагается в кристалле на $Oa = OP \cos \alpha$ и $Ob = OP \sin \alpha$. При разложении фаза колебания не меняется. Фазы колебаний Oa и Ob , следовательно, равны. Пусть разность хода, получающаяся в кристалле, равна целому числу волн (четному числу половин). Для удобства дальнейшего изложения примем, кроме того, что

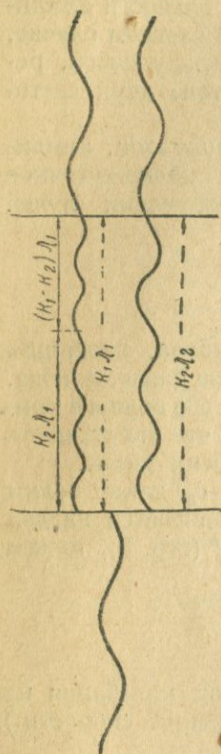


Рис. 54. (Колебания в кристалле, для ясности чертежа, показаны идущими не по одному, а по двум параллельным направлениям.)

длина волны, соответствующая колебаниям Oa , укладывается в толщине кристалла целое число раз. Тогда длина волны, соответствующая колебаниям Ob , также уложится в толщине кристалла целое (но иное) число раз. В этом случае оба луча выйдут из кристалла в той же фазе, в какой они вошли в него. В анализаторе каждый из этих лучей разложится на два, колеблющиеся по направлению OA , совпадавшему в данном случае с OP , и $OA_1 \perp OA$. Из анализатора выйдут лишь лучи, колеблющиеся по OA , а именно: $Oa_1 = Oa \cos \alpha = OP \cos^2 \alpha$ и $Ob_1 = Ob \sin \alpha = OP \sin^2 \alpha$. Из рисунка видно, что эти колебания направлены в одну сторону и, интерферируя, будут усиливать друг друга.

Если длина волны, соответствующая колебаниям Oa , укладывается в толщине кристалла целое число раз, а длина волны, соответствующая Ob , укладывается целое число раз плюс полволны, то разность хода будет равна нечетному числу полуволн. При этом луч Oa выйдет из кристалла в той же фазе, в какой вошел в него, луч же Ob — в фазе противоположной, которую выражает вектор Ob' , равный Ob , но на-

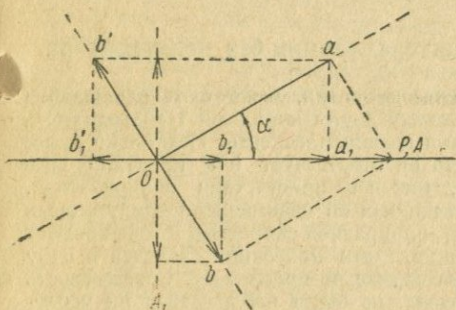


Рис. 55.

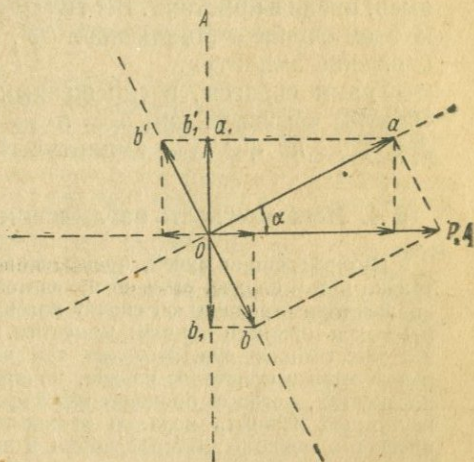


Рис. 56.

правленный в противоположную сторону. В анализаторе Ob' дает составляющую Ob'_1 , направленную в сторону, обратную Oa . Интерференция поведет к ослаблению света. Таким образом в параллельных николях при $\Delta = 2n \frac{\lambda}{2}$ — амплитуды складываются, при $\Delta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$ — вычитаются. Амплитуды колебаний обоих лучей в анализаторе различны и зависят от угла между направлениями колебаний в кристалле и николях. Как показывают полученные выше выражения для значения Oa_1 и Ob_1 , они равны друг другу при $\alpha = 45^\circ$ (так как $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ$).

2. При скрещенных николях (рис. 56). Как и в предыдущем случае, получаем в кристалле два луча с амплитудами колебаний $Oa = OP \cos \alpha$ и $Ob = OP \sin \alpha$. Пусть опять длины волн обоих

лучей укладываются в толщине кристалла целое число раз. Разность хода при этом условии равна целому числу волн $\Delta = n\lambda$. Оба луча выходят из кристалла в одной и той же фазе. В анализаторе каждое колебание снова разлагается на два. Выйти из анализатора могут лучи, колеблющиеся в плоскости OA , которая в данном случае $\perp OP$. Колебания Oa и Ob дадут в плоскости OA составляющие $Oa_1 = Oa \sin \alpha = OP \cos \alpha \sin \alpha$ и $Ob_1 = Ob \cos \alpha = OP \sin \alpha \cos \alpha$; $Oa_1 = Ob_1 = OP \sin \alpha \cos \alpha$.

Из чертежа видно, что векторы Oa_1 и Ob_1 направлены в противоположные стороны и при интерференции будут уничтожать друг друга.

Если одна длина волны, например соответствующая колебанию Oa , укладывается в толщине кристалла целое число раз, а длина волны, соответствующая Ob , — целое число раз + полволны ($\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$), луч Ob выйдет из кристалла в фазе, противоположной той, какую он имел, входя в кристалл. Вектор Ob заменяется ему равным вектором Ob' . В этом случае составляющая $Ob'_1 = Oa_1$ совпадает с Oa_1 . Происходит сложение амплитуд.

Таким образом, в скрещенных николях условия интерференции обратны обычным: при $\Delta = n\lambda$ — амплитуды взаимно уничтожаются, при $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$ — амплитуды складываются.

§ 4. Невозможность наблюдения интерференции без поляризатора

Интерференция лучей, прошедших через кристалл, может быть наблюдаема только в том случае, если он находится между двумя николями. Необходимость анализатора очевидна: он сводит колебания в одну плоскость. Несколько менее ясна роль нижнего николя. Допустим, что он отсутствует и в кристалл входит естественный луч. Этот луч так же, как и в присутствии поляризатора, разлагается в кристалле на два, поляризованных во взаимноперпендикулярных плоскостях, которые проходят через кристалл с разной скоростью и приобретают некоторую разность хода. В верхнем никеле эти колебания сводятся в одну плоскость, однако интерференция в этом случае не произойдет. Освещенность кристалла не будет зависеть от разности хода, не будет наблюдаться ни усиление света, ни его уничтожение. Причина этого лежит в том, что направление колебаний в естественном луче все время и притом очень быстро меняется. В течение одной секунды колебания естественного луча, входящего в кристалл, многократно оказываются то параллельными, то перпендикулярными главному сечению анализатора. Соответственно этому все время меняются условия интерференции. Если, например, $\Delta = n\lambda$, то в тот момент, когда колебания естественного луча параллельны колебаниям анализатора, свет усиливается, а в тот момент, когда колебания естественного луча перпендикулярны колебаниям анализатора, свет уничтожается. Так как эти условия меняются в течение секунды огромное число раз, глаз видит некоторый средний эффект освещенности. При любой другой разности хода будет то же самое.

§ 5. Интерференция белого света. Шкала интерференционных цветов

Выше были разобраны условия интерференции между параллельными и скрещенными николями для монохроматического света. В случае белого света явления значительно усложняются.

Длины волн белого света имеют всевозможные значения в интервале, приблизительно 380—780 м μ . Получающаяся в кристалле разность хода для лучей одних длин волн будет равна четному, для других — нечетному числу полуволн. Поэтому одни длины волн, одни цвета, входящие в состав белого света, будут при интерференции уничтожаться, другие, наоборот, усиливаться. В результате отношение интенсивностей различных цветов будет иным, чем в белом свете, и кристалл будет казаться окрашенным. Каждой разности хода соответствует некоторая интерференционная окраска. Интерференционные цвета не являются чистыми монохроматическими спектральными цветами, а представляют собой смесь в различных пропорциях всех цветов, входящих в состав белого, кроме тех, которые при данной разности хода уничтожаются.

Наблюдение и исследование интерференционных цветов имеет очень большое значение в кристаллооптической методике. Поэтому следует детально познакомиться с цветами, получающимися при различных разностях хода.

В скрещенных николях при $\Delta = 0$ кристалл будет темным. Очень малые разности хода ($\Delta < 100$ м μ) для всех лучей составляют небольшую часть длины волны. Поэтому ни один цвет из входящих в состав белого не будет совершенно погашен, но все они будут иметь весьма малую интенсивность. Кристалл будет казаться серым. При $\Delta \approx 100$ —150 м μ , в сером цвете появляется слабый синеватый оттенок, так как эта разность хода уже приближается к $\frac{1}{2} \lambda$ фиолетовых и синих лучей.

При дальнейшем возрастании разности хода до 200—250 м μ , в аналогичных условиях оказываются длины волн зеленых, желтых и отчасти красных лучей; цвет кристалла будет приближаться к белому. Правда, при этом фиолетовые и синие лучи ($\lambda \approx 400$ —500 м μ) находятся в наиболее благоприятных условиях, так как для них $\Delta \approx \frac{1}{2} \lambda$, но это не скажется на окраске вследствие вообще малой чувствительности нашего глаза к этим лучам.

При $\Delta = 300$ м μ максимально усилены желтые лучи ($\lambda \approx 600$ м μ). Вследствие большой яркости этих лучей интерференционная окраска будет желтой. $\Delta = 530$ м μ приблизительно равна $\frac{2}{3} \lambda$ фиолетового цвета, 1λ зеленого и $\frac{2}{3} \lambda$ красного. Условия интерференции наиболее благоприятны для фиолетовых лучей, несколько менее — для красных и неблагоприятны для зеленых и желтых. В то же время наш глаз гораздо чувствительнее к красным лучам, чем к фиолетовым. Поэтому мы увидим яркую красную окраску с фиолетовым оттенком и т. д.

Как видно из таблицы (стр. 82), цвета при повышении разности хода периодически повторяются. Это позволяет разбить шкалу на порядки, граница между которыми проводится по фиолетовому цвету. В первый порядок входят цвета: серый, белый, желтый, красный, фиолетовый. Второй и каждый из последующих порядков содержат цвета: синий, зеленый, желтый, красный и фиолетовый.

Таким образом, в первом порядке имеются отсутствующие в других порядках серый и белый цвета. Зато в нем нет синего и зеленого цветов, присутствующих в остальных порядках. Как будет показано дальше, это обстоятельство находит свое применение в кристаллооптической методике.

Шкалу интерференционных цветов можно наблюдать при помощи прилагаемого к поляризационному микроскопу так называемого кварцевого клина, представляющего собою вырезанную из

Шкала интерференционных цветов в скрещенных николях¹

Равность хода в μ	Оттенки	Цвета	Порядки
0	черный	черный	
65	стально-серый	}	I
130	синевато-серый		
222	светлый синевато-зеленовато-серый	}	I
246	белый с синевато-зеленоватым оттенком		
272	белый	}	I
352	желтый		
412	коричневый	}	I
473	оранжевый		
489	красновато-оранжевый	}	I
504	красный		
516	карминовый	}	I
551	красно-фиолетовый		
571	сине-фиолетовый	}	II
586	индиговый		
624	синий	}	II
705	зеленовато-синий		
762	синевато-зеленый	}	II
796	зеленый		
828	желтовато-зеленый	}	II
868	зеленовато-желтый		
923	желтый	}	II
936	оранжевый		
990	красно-оранжевый	}	II
1027	красный		
1040	карминовый	}	II
1040	красно-фиолетовый		
1105	сине-фиолетовый	}	III
1136	индиговый		
1151	синий	}	III
1166	зеленовато-синий		
1201	синевато-зеленый	}	III
1286	зеленый		
1327	желтовато-зеленый	}	III
1379	зеленовато-желтый		
1426	желтый светлый	}	III
1441	оранжевый		
1468	красный	}	III
1550	карминовый		
1591	красно-фиолетовый	}	III
1675	серовато-фиолетовый		

и т. д.

¹ Приводимая здесь шкала заимствована с некоторым сокращением и изменением у С. Kraft (Bull. international de l'Acad. des Sci. de Cracovie. Classe des

кварца тонкую пластинку, длиной около 4—5 см и шириной около 1 см. В профиль эта пластинка имеет форму чрезвычайно тонкого клина, толщина которого на толстом конце 0,2—0,3 мм, а на тонком сходит почти до нуля. Для прочности кварцевый клин заклеен между двумя стеклянными пластинками.

Поместив этот клин в диагональном положении между скрещенными николями и передвигая его тонким концом вперед, мы последовательно увидим все интерференционные цвета, начиная с серых I порядка и кончая цветами III или IV порядка. При этом можно заметить, что границы между порядками устанавливаются весьма резко. Красно-фиолетовый цвет сливается с красным, сине-фиолетовый — с синим. Переход же от красно-фиолетового к сине-фиолетовому хорошо чувствуется глазом.

Интересно отметить, что эта граница может несколько перемещаться в зависимости от состава применяемого света. Указанное в таблице для границы I и II порядка значение $\Delta = 551$ м μ , справедливо при применении «стандартного» белого света, каким является, например, свет солнца, рассеянный облаками. Свет чистого неба более богат лучами коротких длин волн, чем «стандартный». В связи с этим сине-фиолетовая интерференционная окраска получается при меньшей разности хода, а именно: уже при 540—545 м μ .

Наоборот, свет обычно применяемых электроламп более богат лучами большой длины волны. При этом свете переход красно-фиолетового цвета I порядка в сине-фиолетовый наблюдается при $\Delta = 555$ м μ и даже несколько выше.

Положив на столик микроскопа кварцевый клин и совместив с крестом нитей границу I и II порядка, можно, меняя источник света, заметить небольшое перемещение этой границы.

В первом и во втором порядках оттенки цветов выражены наиболее резко. Дальше они постепенно бледнеют и сливаются друг с другом. Начиная с IV—V порядка, каждый порядок кажется состоящим всего из двух частей — светлой синева-зеленой и бледнорозовой. Появляются своеобразные «перламутровые тона». При очень больших разностях хода все цвета сливаются, и получается белая интерференционная окраска высших порядков. В гл. VI, § 6 и гл. VII, § 5 будет указано, как отличать эту окраску от белой I порядка.

Перламутровые тона и белый цвет высших порядков появляются вследствие того, что большие разности хода отвечают четному числу полуволн не для двух-трех, а для целого ряда лучей, тем большего, чем больше разность хода. Все эти лучи гасятся, а промежуточные между ними, для которых данная разность хода равна нечетному числу полуволн, обладают максимальной интенсивностью. Получающаяся при их смешении окраска содержит разные цвета спектра. Эта окраска тем более приближается к белой, чем более дробно разбит интерференцией спектр первоначального белого света на участки, погасающие и максимально интенсивные. Чтобы пояснить сказанное, возьмем, например, разность

Sci. math. et naturelles, 1902, pp. 310—353). Цифры этой шкалы несколько отличаются от обычно приводимых в руководствах по кристаллооптике цифр, которые были получены еще в середине прошлого века при помощи недостаточно совершенных методов.

хода, равную 5300 $\text{m}\mu$, что соответствует десятому порядку. В скрещенных николях максимальной интенсивностью, как мы знаем, обладают лучи, для которых $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$. В данном случае 5300 $\text{m}\mu = 7\frac{1}{2} \cdot 706 \text{ m}\mu$ (красные) $= 8\frac{1}{2} \cdot 624 \text{ m}\mu$ (оранжевые) $= 9\frac{1}{2} \cdot 558 \text{ m}\mu$ (зелено-желтые) $= 10\frac{1}{2} \cdot 505 \text{ m}\mu$ (зеленые) $= 11\frac{1}{2} \cdot 466 \text{ m}\mu$ (синие) $= 12\frac{1}{2} \cdot 424,5 \text{ m}\mu$ (синие) $= 13\frac{1}{2} \cdot 393 \text{ m}\mu$ (фиолетовые). Смещение всех этих цветов и дает интерференционную окраску, соответствующую $\Delta = 5300 \text{ m}\mu$. Мы видим, что здесь перечислены все основные цвета спектра. Очевидно, их смесь будет производить на наш глаз впечатление белого света.

§ 6. Интерференционные цвета в параллельных николях

Лучи, для которых $\Delta = n\lambda$ и которые в скрещенных николях уничтожаются, в параллельных николях интерferируют с усилением. Те же лучи, для которых $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$ в скрещенных николях усиливаются, а в параллельных ослабляются (гл. VI, § 3). Поэтому, очевидно, что при параллельных николях усиливаются и принимают участие в образовании интерференционной окраски именно те цвета, которые в скрещенных погашены.

Цвета интерференции в скрещенных и параллельных николях для каждой разности хода являются дополнительными друг к другу до белого цвета.

Последовательность цветов в параллельных николях та же, что и в скрещенных; отличия заключаются лишь в следующем. Шкала цветов в параллельных николях сдвинута на $\frac{1}{2}$ порядка по сравнению со шкалой в скрещенных николях. Фиолетовый цвет появляется не на границе II порядка, а в середине I. Серые и белые окраски, которыми начинается шкала цветов в скрещенных николях, здесь заменены желтыми и бурными. Все порядки, кроме первого, в параллельных николях состоят из желтого, красного, фиолетового, синего и зеленого цветов.¹

Приводим на стр. 85 сокращенную шкалу цветов в параллельных николях, приблизительно указывая соответствующие им цвета в скрещенных.

Параллельными николями в практической работе пользуются редко. Они бывают полезны, когда исследуемое вещество слабо двупреломляет и в скрещенных николях все кристаллы кажутся однообразно окрашенными в серые и белые цвета. В этом случае при параллельных николях окраски будут более разнообразны, и, пользуясь ими, легко можно найти необходимые для некоторых определений кристаллы, дающие наибольшую разность хода. Николи полезно ставить на параллельность и в том случае, когда необходимо отличить белую окраску высших порядков от такой же окраски I порядка. Если при параллельных николях окраска не меняется, белый цвет относится к высшим

¹ В первых двух порядках эти цвета имеют оттенки, несколько отличные от цветов скрещенных николей.

Сопоставление интерференционных окрасок в параллельных и скрещенных николях

В параллельных николях	В скрещенных николях
I порядок	
белый	черный
желтовато-белый	серый
светлоричичевый	
красновато-оранжевый	
красный	белый
темнокарминовый	
темнопурпуровый	
темнофиолетовый	
индиговый	желтый
синий	
зеленовато-синий	
	коричневый
синевато-зеленый	оранжевый
	красный
зеленый	пурпуровый

II порядок

желтовато-зеленый	фиолетовый
желтый	синий
оранжевый	
красновато-оранжевый	
красный	зеленый
карминовый	
пурпуровый	желтовато-зеленый
фиолетовый	зеленовато-желтый
синий	желтый
	оранжевый
зеленый	красный
	пурпуровый

и так далее.

При высокой разности хода как в параллельных, так и в скрещенных николях имеем белый цвет высших порядков.

порядкам. Если же в скрещенных николях мы имеем белый цвет I порядка, в параллельных получим соответствующий ему бурый.

Чтобы наблюдать цвета интерференции в параллельных николях, надо: 1) поставить кристалл на погасание (в скрещенных николях),

2) повернуть его ровно на 45° , 3) повернуть один из николей на 90° . Если эти условия не выполнены, то в общем случае кристалл будет казаться белым или почти белым. В самом деле, в случае параллельных николей амплитуды интерферирующих лучей равны друг другу, только если колебания в кристалле делают 45° с колебаниями в николях (гл. VI, § 3). Только при этом условии лучи, интерферирующие в противоположных фазах, полностью уничтожают друг друга. При других положениях кристалла относительно николей амплитуды интерферирующих лучей не равны друг другу, и даже те из них, для которых $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$, не будут полностью погашены в результате интерференции, а только ослаблены. Поэтому качественный состав света не изменится. Интерференционная окраска, соответствующая данной разности хода, будет сильно разбавлена белым светом. Если углы между направлениями колебаний в кристалле и николях значительно отличаются от 45° , примесь белого цвета настолько велика, что интерференционная окраска становится неразличимой.

Глава VII

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИМЕНОВАНИЯ ОСЕЙ ДАННОГО СЕЧЕНИЯ ИНДИКАТРИСЫ И ЗНАКА УДЛИНЕНИЯ КРИСТАЛЛА

§ 1. Параллельность прямая и обратная

Поместим два кристалла на столик микроскопа один над другим и при этом так, чтобы направления колебаний в обоих кристаллах были параллельны.

Обозначим направления колебаний и показатели преломления в первом кристалле n'_{gI} и n'_{pI} , а во втором n'_{gII} и n'_{pII} .¹

Возможны два случая:

1. **Прямая параллельность** — когда совпадают одноименные оси обоих кристаллов, т. е. $n'_{gI} \parallel n'_{gII}$ и $n'_{pI} \parallel n'_{pII}$ (рис. 57, а).

2. **Обратная параллельность**, — когда совпадают разноименные оси, т. е. $n'_{gI} \parallel n'_{pII}$ и $n'_{pI} \parallel n'_{gII}$ (рис. 57, б).

Разность хода при прямой и обратной параллельности. На рис. 58 колебания одной волны совершаются в плоскости чертежа, а другой перпендикулярно к чертежу (изображаются точками). В первом кристалле волна с колебаниями по n'_{gI} отстанет от более быстрой волны с колебаниями по n_{pI} на некоторую величину Δ_1 (разность хода). По выходе из кристалла I, в воздухе эти волны распространяются с одинаковой скоростью, сохраняя между собой ди-

¹ n'_g и n'_p — больший и меньший показатели преломления данного сечения. Обозначения n_g , n_m и n_p (без штриха) будем применять в дальнейшем только в тех случаях, когда известно, что тот или иной показатель данного сечения является одним из главных показателей преломления кристалла.

станцию Δ_1 . Войдя в кристалл II, волна 1, в случае прямой параллельности, колеблется по $n'_{рп}$ (рис. 58, а) и снова приобретает большую скорость по сравнению с волной 2, колеблющейся по $n'_{гп}$. В результате дистанция между этими волнами увеличивается на некоторую величину Δ_{II} , и окончательная разность хода — $\Delta_{\Sigma} = \Delta_1 + \Delta_{II}$.

При прямой параллельности разности хода, приобретаемые светом в обоих кристаллах, складываются, и окончательная разность хода равна их сумме.

В случае обратной параллельности (рис. 58, б), волна 1, оказавшаяся по выходе из первого кристалла впереди, во втором кристалле колеблется по $n'_{гп}$ и движется медленнее, чем отставшая от нее волна 2, которая теперь колеблется по $n'_{рп}$. Волна 2 начинает догонять волну 1, и разность хода уменьшается; $\Delta_{\Sigma} = |\Delta_1 - \Delta_{II}|$.

При обратной параллельности разности хода, приобретаемые светом в обоих кристаллах, уменьшают друг друга, и окончательная разность хода равна их разности.

Для строгого доказательства этих положений воспользуемся введенным в гл. 6, § 2 представлением о разности хода как разности оптических путей и формулой $\Delta = d(n'_g - n'_p)$.

Обозначим через d_I и d_{II} толщины кристаллов I и II.

А. При прямой параллельности.

Оптический путь волны 1 в обоих кристаллах равен $d_I n'_{рп} + d_{II} n'_{рп}$.

Оптический путь волны 2 равен: $d_I n'_{гп} + d_{II} n'_{гп}$;

$$\Delta_{\Sigma} = d_I n'_{гп} + d_{II} n'_{гп} - d_I n'_{рп} - d_{II} n'_{рп} = (d_I n'_{гп} - d_I n'_{рп}) + (d_{II} n'_{гп} - d_{II} n'_{рп}) = d_I (n'_{гп} - n'_{рп}) + d_{II} (n'_{гп} - n'_{рп}) = \Delta_1 + \Delta_{II}.$$

В. При обратной параллельности.

Оптический путь волны 1 равен: $d_I n'_{рп} + d_{II} n'_{гп}$.

Оптический путь волны 2 равен: $d_I n'_{гп} + d_{II} n'_{рп}$;

$$\Delta_{\Sigma} = d_I n'_{гп} + d_{II} n'_{рп} - d_I n'_{рп} - d_{II} n'_{гп} = (d_I n'_{гп} - d_I n'_{рп}) - (d_{II} n'_{гп} - d_{II} n'_{рп}) = d_I (n'_{гп} - n'_{рп}) - d_{II} (n'_{гп} - n'_{рп}) = \Delta_1 - \Delta_{II}.$$

Если $\Delta_{II} > \Delta_1$, то при обратной параллельности отставшая в первом кристалле волна 2 перегоняет волну 1 и $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{II} - \Delta_1$. Если $\Delta_{II} = \Delta_1$, то при прямой параллельности $\Delta_{\Sigma} = 2 \Delta_1$, в случае же обратной параллельности $\Delta_{\Sigma} = 0$. Волна 2 догоняет волну 1, и разность

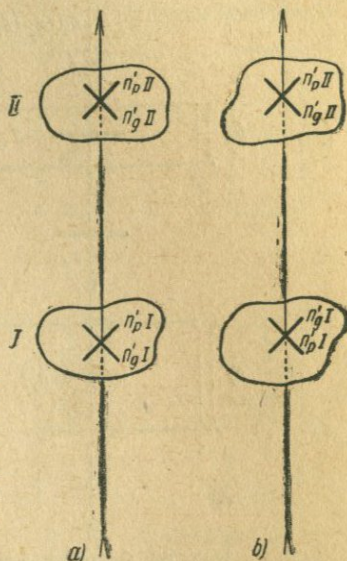


Рис. 57. I и II — два кристалла, расположенные последовательно один над другим: а) — прямая параллельность: $n'_{гп} \parallel n'_{гп}$, $n'_{рп} \parallel n'_{рп}$; б) — обратная параллельность: $n'_{гп} \parallel n'_{рп}$, $n'_{рп} \parallel n'_{гп}$.

хода уничтожается. В скрещенных николях вместо интерференционной окраски будет темнота.

Такое уничтожение разности хода, возникающей в одном кристалле, равной ей раз-

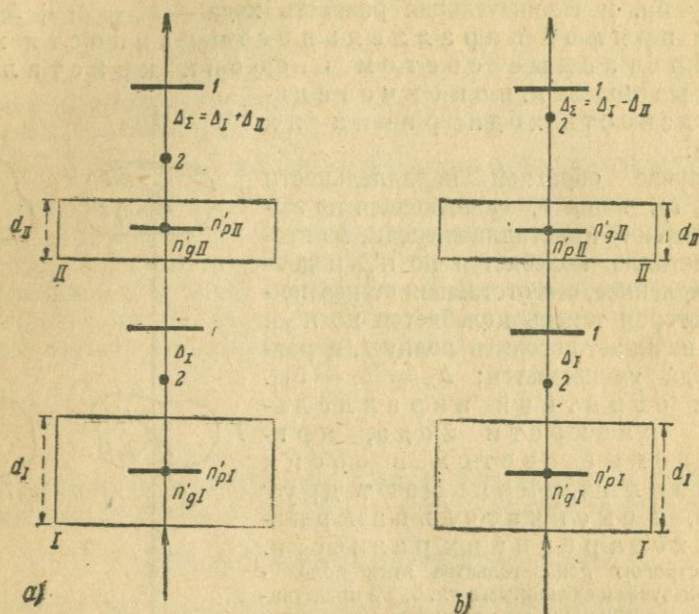


Рис. 58. Разность хода: а) — при прямой и б) — при обратной параллельности.

ностью хода в другом, имеющее место при обратной параллельности, называется компенсацией.

§ 2. Знак удлинения (знак главной зоны) кристалла

Принято говорить, что кристалл имеет положительное удлинение (положительный знак главной зоны), если по длине кристалла совершаются колебания луча, имеющего больший показатель преломления — n'_g (рис. 59, а).

Кристалл имеет отрицательное удлинение, если по его длине колеблется луч с меньшим показателем — n'_p (рис. 59, б).

Если кристалл обладает косым погасанием, т. е. колебания совершаются не параллельно ребрам, удлинение считается положительным, когда колебание n'_g образует с направлением длины

кристалла меньший угол, чем колебание n'_p (рис. 59, а). В обратном случае, когда с направлением длины кристалла меньший угол образует колебание n'_p , удлинение считается отрицательным (рис. 59, б). Если оба направления колебаний образуют с длиной кристалла углы, одинаковые в пределах точности измерения (равные 45°), удлинение следует считать нейтральным. Этот случай на практике редок.

Очевидно, о знаке удлинения можно говорить лишь в тех случаях, когда кристалл имеет отчетливо удлиненную форму и правильные очертания или когда на кристалле заметны штрихи спайности, направление которых принимается за направление удлинения кристалла.

Для определения знака удлинения пользуются так называемыми пробными пластинками или компенсаторами, в которых заранее известно расположение осей n_g и n_p . Эти пластинки вставляются в особый прорез, расположенный в нижней части тубуса микроскопа непосредственно над объективом, под углом 45° к направлениям колебаний в николях.¹ Исследуемый кристалл поворотом столика микроскопа на 45° от положения погасания приводится в положение, при котором направления колебаний в нем параллельны направлениям колебаний в пробной пластинке. По изменению интерференционной окраски можно судить — прямая или обратная параллельность имеет место в данном случае и, поскольку известно расположение n_g и n_p в пробной пластинке, выяснить расположение n'_g и n'_p в кристалле.

В зависимости от интерференционной окраски исследуемого кристалла применяются различные пробные пластинки. Так, если окраска кристалла серая или белая, или другая, но заведомо 1 порядка, применяется гипсовая пластинка. Если окраска кристалла выше I порядка или порядок окраски неизвестен, применяется к в а р ц е в ы й к л и н (метод компенсации) или пластинка «четверть волны». Если на краях кристалла окраска ниже, чем в его средней части (часто бывает в иммерсионных препаратах), может быть применен кварцевый клин (метод бегущих полосок) или гипсовая пластинка. Техника определения знака удлинения для всех этих случаев изложена ниже.

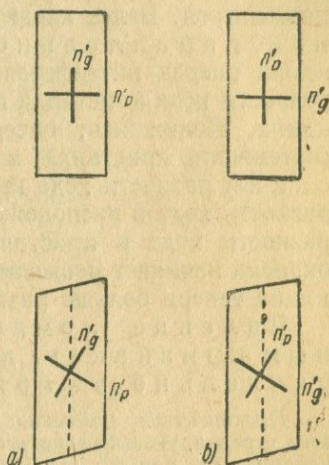


Рис. 59. Кристаллы: а) — с положительным и б) — с отрицательным удлинением.

¹ В некоторых микроскопах прорез для пробных пластинок параллелен направлениям колебаний в николях (см. примечание к § 5 этой главы).

§ 3. Определение знака удлинения кристалла при помощи кварцевого клина методом компенсации

Кварцевый клин, о котором упоминалось в § 5, главы VI, может быть использован для определения знака удлинения кристалла.¹ Будем вдвигать клин тонким концом вперед в прорез тубуса над кристаллом, направления колебаний которого расположены под 45° к нитям окулярного креста. В случае прямой параллельности разности хода кристалла будет прибавляться к разности хода клина. При вдвигании клина, по мере его утолщения, интерференционная окраска будет повышаться. Более характерные явления имеют место при обратной параллельности. В этом случае по мере продвижения клина вперед интерференционная окраска понижается, так как из разности хода кристалла вычитается все возрастающая разность хода клина. Понижаясь, интерференционная окраска доходит до нуля (потемнение кристалла) в тот момент, когда имеет место компенсация разности хода кристалла разностью хода клина, т. е. когда разность хода в расположенном над кристаллом участке клина равна разности хода в кристалле. При дальнейшем продвижении клина окраска начинает повышаться, так как увеличивающаяся разность хода клина теперь больше разности хода кристалла.

Явление компенсации служит характерным признаком, доказывающим обратную параллельность кристалла относительно клина.

Практические замечания: 1. На кварцевом клине должна быть нанесена стрелка, указывающая его тонкий конец, и помечена ориентировка, т. е. какая ось (n_g или n_p) расположена вдоль клина. При отсутствии этих пометок работник должен сам нанести их. Тонкий конец узнается по низкой окраске, путем наблюдения при слабом увеличении интерференционных цветов в клине, положенном на столик микроскопа. Ориентировка осей клина определяется по какому-либо известному минералу или пробной пластинке.

Обычно по длине клина расположена ось n_p . На рис. 60 показано расположение кристаллов с положительным и отрицательным удлинением относительно такого клина в момент компенсации.

2. Для того чтобы компенсация наблюдалась достаточно отчетливо, необходимо выполнить ряд условий. Должна быть по возможности точно соблюдена параллельность между направлениями колебаний в кристалле и клине. Для этого поворотом столика микроскопа кристалл ставится на погасание (в этот момент направления колебаний в кристалле параллельны колебаниям в николях), после чего столик поворачивается ровно на 45° . Если после этого, при вдвигании клина, компенсация не наблюдается, по видимому имеет место прямая параллельность. Чтобы получить обратную параллельность, надо от этого положения повернуть столик ровно на 90° .

Оси n_g и n_p у правильно изготовленного клина должны быть параллельны его ребрам. Для проверки следует наблюдать при слабом увеличении погасание клина, положенного на столик микроскопа (клин должен обладать прямым погасанием). Допускаемая погрешность — $1,5-2^\circ$.

Свет должен быть по возможности параллельным, поэтому необходимо прикрывать диафрагму. Чем сильнее источник света, тем больше можно закрыть диафрагму и тем резче видна компенсация. Начинающим работникам рекомен-

¹ Во всех случаях вместо кварцевого клина удобнее пользоваться компенсатором Берекка, описанным в главе IX.

дуются, если допускает величина объекта, наблюдать компенсацию при малом или среднем увеличении.

3. В некоторых кристаллах, вследствие ряда причин (неоднородность кристалла, дисперсия силы двупредромления), даже при выполнении перечисленных выше условий компенсация наблюдается не достаточно отчетливо, и кристалл кажется не темным, а серым. С другой стороны, и при прямой параллельности кристалл может иногда показаться темным. Это бывает, когда при вдвинутом клине кристалл приобретает синюю окраску II или III порядка при одновре-

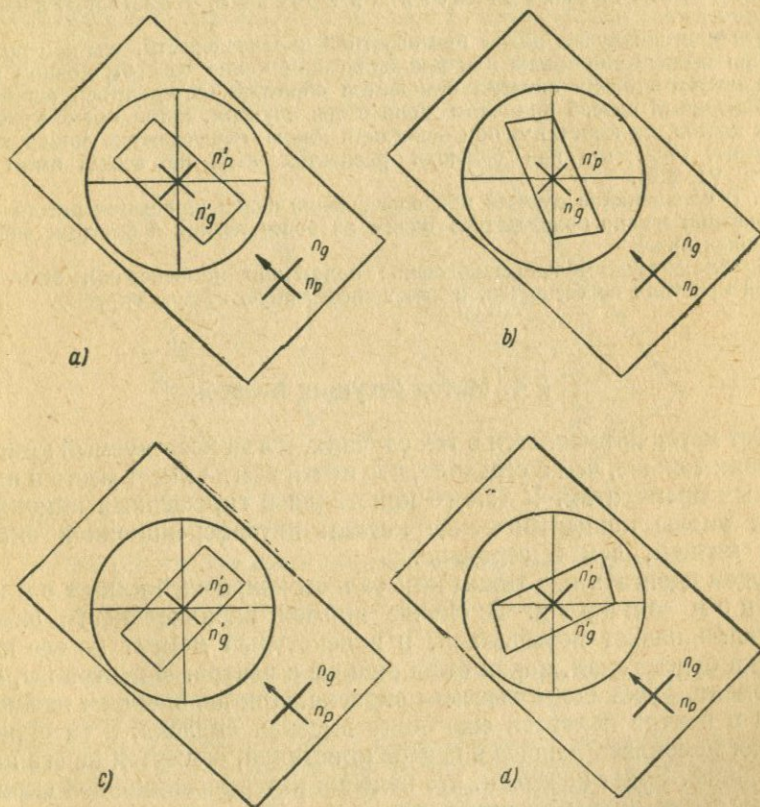


Рис. 60. Положение кристалла относительно кварцевого клина, имеющего по длине n_p , в момент компенсации: *a)* и *b)* — удлинение +, *c)* и *d)* — удлинение —; кристаллы *a)* и *c)* имеют прямое погасание, *b)* и *d)* — косое погасание.

менном окрашивании поля вокруг кристалла в желтый или желтовато-зеленый цвет. Если при этом размеры кристалла малы, его синяя окраска, по сравнению с ярким освещением поля, кажется черной или темносерой.

Во избежание ошибки следует от предполагаемого момента компенсации немного передвигать клин в обе стороны. В обоих случаях окраска кристалла должна повышаться; кристалл в некоторый момент станет белым, затем желтым, красным, синим и т. д. Таким образом в положении компенсации кристалл кажется черным или серым. При дальнейшем вдвигании или выдвигании клина от этого положения, кристалл в некоторый момент становится белым, а затем окрашивается в более высокие цвета.

4. При высокой интерференционной окраске кристалла, когда разность хода в нем выше, чем в самой толстой части клина, компенсация не наступает ни при одном из двух положений параллельности.

В этом случае можно пытаться определить параллельность, наблюдая последовательность смены цветов на кристалле при движении клина. Если при вдвигании клина тонким концом вперед кристалл из красного непосредственно становится синим, — параллельность прямая. Если при тех же условиях кристалл из синего непосредственно становится красным, — параллельность обратная.

Эти явления лучше видны при обратной параллельности, чем при прямой. При выдвигании клина или при вдвигании клина толстым концом вперед смена цветов в обоих случаях становится обратной (остерегаться ошибок!).

Описанный способ применим лишь в тех случаях, когда, кроме красных и синих цветов, на кристалле при вдвигании клина наблюдаются также желтые и зеленые тона, что при больших разностях хода не всегда имеет место (см. гл. VI, § 5).

5. В большинстве случаев при определении знака удлинения вместо метода компенсации можно пользоваться одним из более легких и быстрых способов, описанных ниже.

Крайне затруднительно нахождение положения компенсации, если исследуемый кристалл не бесцветен, а имеет собственную густую окраску.

§ 4. Метод бегущих полосок

Этот метод применяется в тех случаях, когда исследуемый кристалл на краях тоньше, чем в середине, что почти всегда имеет место в иммерсионных препаратах. У такого кристалла в скрещенных николях на краях видны концентрические каемки интерференционной окраски более низкой, чем в середине.

Будем вдвигать над таким кристаллом кварцевый клин тонким концом вперед. В случае прямой параллельности окраска кристалла начнет повышаться, и в некоторый момент на его краях окраска будет такая, какая была раньше в центре. В центре же, в тот же момент, будет более высокая окраска. При дальнейшем вдвигании клина в центре появится еще более высокая окраска, а та окраска, которая появилась раньше в центре кристалла, окажется на его краях и так далее. Будет казаться, что полоски интерференционной окраски, которые были видны на кристалле без клина, пришли в движение и перемещаются от центра к краям. В центре же все время появляются новые цвета.

В случае обратной параллельности при тех же условиях окраска кристалла начнет понижаться, и в некоторый момент в центре будет такая окраска, которая была раньше на краях, а на краях мы увидим другую, еще более низкую окраску. При вдвигании клина низкая окраска с краев будет переходить к центру кристалла, а на краях будут появляться новые цвета.

Итак, при вдвигании клина острым концом вперед, в случае прямой параллельности, каемки интерференционной окраски перемещаются от центра кристалла к его краям

(рис. 61, а), в случае обратной параллельности каемки перемещаются от краев к центру (рис. 61, б).

Примечание. Это правило выведено в предположении, что края кристалла, как это обычно бывает, тоньше, чем середина, и, следовательно, интерференционная окраска на краях ниже, чем в центре. В дальнейшем мы встретимся со случаями, когда окраска в центре ниже, чем на краях. Для таких случаев изложенное выше правило становится неверным. Поэтому, наряду с ним, запомним общую формулировку, справедливую во всех случаях. При вдвигании клина тонким концом вперед в случае прямой параллельности высокие интерференционные цвета перемещаются на место низких. В случае обратной параллельности низкие цвета переходят на место высоких.

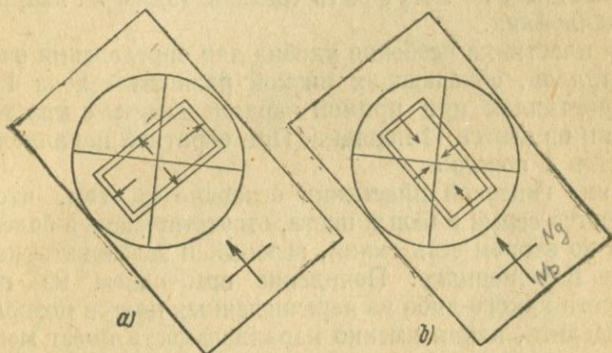


Рис. 61. Перемещение цветных каемок на кристалле при вдвигании клина (показано стрелками): а) — прямая параллельность; б) — обратная параллельность.

В случае густо окрашенных кристаллов метод бегущих полосок часто является единственным, дающим возможность определить характер параллельности и, следовательно, знак удлинения.

Практические замечания: 1. Метод бегущих полосок не требует такого точного осуществления параллельности, как метод компенсации. Нет нужды ставить кристалл на погасание и брать отсчеты по лимбу столика, чтобы расположить направления колебаний под 45° к нитям. Достаточно, вращая столик, поставить кристалл в положение максимального просветления. Для кристалла с прямым погасанием достаточно поставить на глаз его ребра под 45° к нитям.

2. Вдвигая клин, не следует обращать внимание на последовательность смены цветов на кристалле, как при методе компенсации. Надо лишь следить за передвижением цветных полосок. Чтобы это передвижение было заметно, надо вдвигать клин не слишком медленно. Требуемая скорость движения клина легко находится на практике.

При обратной параллельности передвижение полосок обычно лучше заметно, чем при прямой.

3. При выдвигании клина или при вдвигании его толстым концом вперед направление бега полосок меняется на обратное. Об этом необходимо помнить во избежание ошибок при определении параллельности.

4. Если скошенный край кристалла очень узок и цветная каемка слишком тонка, ее движение легче заметить при большом увеличении. Такие тонкие каемки часто заметны на краях зерен с высокой интерференционной окраской в петрогра-

фических шлифах. Здесь, однако, следует быть осторожным, так как в шлифе иногда, если исследуемое зерно окружено зернами более твердых минералов, его края могут быть толще, чем середина.

§ 5. Гипсовая пластинка

Так называется пробная пластинка, имеющая в скрещенных направлениях красно-фиолетовую окраску, пограничную между I и II порядками ($\Delta \approx 550 \text{ м}\mu$). По техническим условиям изготовления пластинки часто оказываются несколько тоньше, чем нужно, и вместо красно-фиолетовой имеют красную окраску I порядка. Практически это обстоятельство существенного значения не имеет. Изготавливаются пластинки из гипса, но могут быть сделаны также из кварца, мусковита или целлофана.

Гипсовая пластинка особенно удобна для определения знака удлинения кристаллов, обладающих низкой разностью хода I порядка. На таких кристаллах при прямой параллельности с пластинкой получается один из цветов II порядка. При обратной параллельности — один из цветов I порядка.

Применение гипсовой пластинки основано на том, что в I порядке имеются серый и белый цвета, отсутствующие в более высоких порядках, а во втором есть синий, зеленый и зеленовато-желтый, отсутствующие в I порядке. Появление при одном из положений параллельности какого-либо из перечисленных цветов позволяет однозначно определить, какая именно параллельность имеет место в данный момент, а следовательно и решить вопрос о знаке удлинения кристалла.

Примеры: а) Разность хода кристалла $\Delta_1 = 100 \text{ м}\mu$, цвет серый I порядка. Разность хода гипсовой пластинки $\Delta_2 = 550 \text{ м}\mu$. При одном положении параллельности $\Delta_\Sigma = 550 + 100 = 650 \text{ м}\mu$, — зеленовато-синий цвет II порядка. При другом положении параллельности $\Delta_\Sigma = 550 - 100 = 450 \text{ м}\mu$ — оранжевый I порядка.

б) $\Delta_1 = 240 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла белый I порядка.

При одном положении параллельности $\Delta_\Sigma = 790 \text{ м}\mu$ — зеленый II порядка.

При другом положении параллельности $\Delta_\Sigma = 310 \text{ м}\mu$ — желтый I порядка.

В обоих случаях, наблюдая оранжевый и желтый цвета, мы не можем решить вопрос о характере параллельности, так как эти цвета возможны и в I и во II порядке. Повернув столик на 90° (на вторую параллельность), видим синий или зеленый цвет, однозначно указывающий на прямую параллельность.

с) $\Delta_1 = 300 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла желтый I порядка. При одной параллельности $\Delta_\Sigma = 850 \text{ м}\mu$ желтый II порядка. При другой параллельности $\Delta_\Sigma = 250 \text{ м}\mu$ — белый I порядка.

д) $\Delta_1 = 500 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла красный I порядка. При одной параллельности $\Delta_\Sigma = 1050 \text{ м}\mu$ — красный II порядка. При другой параллельности $\Delta_\Sigma = 50 \text{ м}\mu$ — серый I порядка, почти черный.

В этих двух случаях однозначное решение получаем для обратной параллельности.

Некоторые затруднения возможны в следующем случае.

е) $\Delta_1 = 275 \text{ м}\mu$ — цвет кристалла светложелтый I порядка. При прямой параллельности $\Delta_\Sigma = 825 \text{ м}\mu$ — цвет на границе желто-зеленого и зеленовато-желтого II порядка. При обратной параллельности $\Delta_\Sigma = 275 \text{ м}\mu$ — светложелтый I порядка. Неопытному глазу может показаться, что в обоих положениях цвет кристалла такой же, как и без гипсовой пластинки. Более внимательное наблю-

дение позволяет при одном из положений обнаружить зеленоватый оттенок и тем самым решить вопрос о параллельности.

f) При разности хода в кристалле, соответствующей началу II порядка, еще можно пользоваться гипсовой пластинкой. Например, $\Delta l = 800 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла зеленый II порядка. При одном положении параллельности $\Delta \Sigma = 1350 \text{ м}\mu$ — желтовато-зеленый III порядка. При другом положении $\Delta \Sigma =$

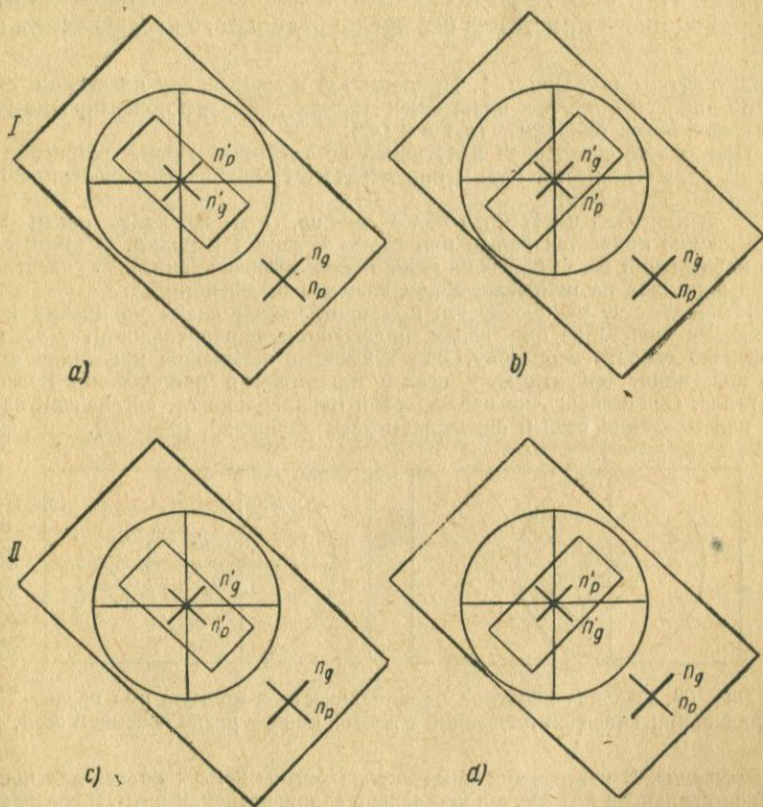


Рис. 62. Кристаллы с положительным и отрицательным удлинением в положениях прямой и обратной параллельности относительно гипсовой пластинки:

I. Без пластинки — желтый I порядка; a) — с пластинкой окраска серая I порядка; параллельность обратная; знак удлинения +; b) — с пластинкой окраска зелено-желтая II порядка; параллельность прямая; знак удлинения +. II. Без пластинки — серый I порядка; c) — с пластинкой, окраска синяя II порядка; параллельность прямая; знак удлинения —; d) — с пластинкой, окраска желтая I порядка; параллельность обратная; знак удлинения —.

$= 00 - 550 = 250 \text{ м}\mu$ — белый цвет I порядка, однозначно указывающий на обратную параллельность.

При еще более высокой разности хода в кристалле гипсовая пластинка бесполезна, как видно из следующего примера.

g) Цвет кристалла красный II порядка ($\Delta l = 1040 \text{ м}\mu$). При прямой параллельности $\Delta \Sigma = 1590 \text{ м}\mu$ — красный III порядка. При обратной параллельности $\Delta \Sigma = 490 \text{ м}\mu$ — красный I порядка. Во всех трех случаях видим почти одинаковую для глаза красную окраску.

С помощью гипсовой пластинки легко отличить белую окраску I порядка от белой окраски высших порядков (гл. VI, § 5). Последняя не изменяется ни при прямой, ни при обратной параллельности.

На практике гипсовой пластинкой пользуются главным образом для кристаллов, имеющих серую, белую или желтоватую окраску I порядка. При всех других окрасках возможны недоразумения, так как порядок цвета кристалла без предварительного исследования неизвестен.

Практические замечания: 1. Прилагаемые к микроскопу пластинки обычно имеют по длине ось n_p . На пластинках германских фирм ориентировка указывается готическими буквами a (n_p) и c (n_g).

2. При работе с гипсовой пластинкой не требуется точной установки кристалла на параллельность. Как и при методе бегущих полосок достаточно приблизительной установки.

3. Если кристалл имеет края более тонкие, чем середину, почти всегда цветная каемка кончается белым или серым цветом I порядка. В таком случае вместо наблюдения бега полосок можно пользоваться гипсовой пластинкой, обращая внимание на изменение цвета внешней белой полоски.

4. Начинающему рекомендуется при определении знака удлинения наблюдать окраску кристалла при обоих положениях параллельности. Для обоих случаев надо сделать зарисовку, показывающую положение кристалла относительно пластинки, ориентировку осей в пластинке и направления колебаний в кристалле. Основываясь на наблюдаемой параллельности, обозначаем на кристалле наименования осей и определяем знак удлинения (рис. 62).

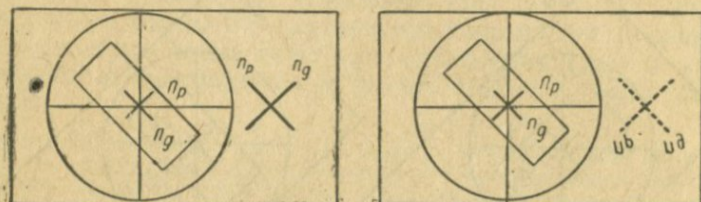


Рис. 63. Переход обратной параллельности в прямую при переворачивании гипсовой пластинки с диагональным расположением осей.

Примечание. В устаревших микроскопах фирмы Seibert прорез для пробных пластинок сделан не под 45° , а параллельно горизонтальной нити. В соответствии с этим оси n_g и n_p в приложенных к ним пластинках расположены под 45° к ребрам. Такая конструкция позволяет переходить от прямой параллельности к обратной или наоборот, не поворачивая столик микроскопа на 90° , простым переворачиванием пластинки верхней стороной вниз (рис. 63). Так же устроены и кварцевые клинья, прилагаемые к микроскопам этой конструкции.

§ 6. Пластинка «четверть волны»

Так называется пробная пластинка, приготовляемая из мусковита и дающая разность хода, равную $\frac{1}{4} \lambda$ какого-либо определенного монохроматического света. Эта пластинка предназначена для некоторых специальных определений, здесь нами не рассматриваемых, но может оказаться полезной и при определении знака удлинения.

Разность хода пластинки $\frac{1}{4} \lambda$ обычно лежит в пределах 130—150 $m\mu$ (интерференционная окраска в скрещенных николях серая

I порядка). Такая пластинка увеличивает или уменьшает разность хода исследуемого кристалла примерно на $\frac{1}{4}$ порядка (весь порядок ~ 550 м μ) и меняет интерференционную окраску кристалла на какую-либо из соседних с ней по шкале интерференционных цветов в сторону повышения или понижения (в зависимости от прямой или обратной параллельности).

Так, например, при прямой параллельности синий цвет перейдет в зеленый или зеленовато-желтый. Зеленый перейдет в желтый или оранжевый. Желтый — в красный или красно-фиолетовый. Красный перейдет в синий. При обратной параллельности синий цвет перейдет в красно-оранжевый или красный. Зеленый — в фиолетовый или синий. Желтый — в зеленовато-синий или зеленый (желтый I порядка перейдет в серый или белый), красный перейдет в желтый.

Пластинка $\frac{1}{4} \lambda$ может быть полезна при определении знака удлинения кристаллов, обладающих цветами II или III порядка, для которых гипсовая пластинка не дает однозначного решения. В IV и более высоких порядках цвета становятся неясными, и применение пластинки $\frac{1}{4} \lambda$ затруднено.

§ 7. Связь между знаком удлинения и оптическим знаком кристалла

В кристаллах средних сингоний, как указано в гл. IV, § 5, с главной осью симметрии совпадает ось вращения индикатрисы (n_g — в оптически положительных и n_p — в оптически отрицательных кристаллах). Поэтому, если кристаллы удлинены по главной оси, что имеет место для большинства одноосных веществ, знак удлинения и оптический знак кристалла совпадают (рис. 64). Кристаллы, сплюснутые по главной оси (имеющие форму табличек), имеют знак удлинения, обратный оптическому знаку кристалла (рис. 65).

Изложенное справедливо для петрографических шлифов, где мы имеем дело с различными сечениями кристаллов. В иммерсионных же препаратах табличчатые кристаллы, в подавляющем большинстве, ложатся на предметное стекло своей наиболее крупной гранью, т. е. гранью пинакоида, параллельной кругловому сечению индикатрисы. Под микроскопом эти кристаллы обнаруживают

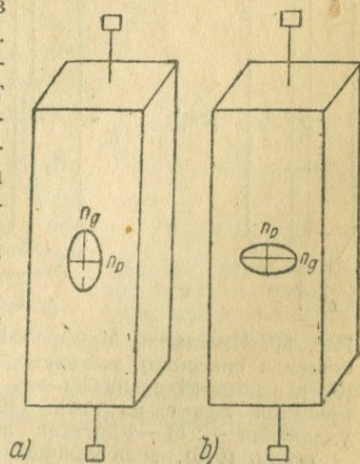


Рис. 64. Удлиненные одноосные кристаллы. Оптический знак кристалла и знак удлинения на грани призмы совпадают: а) — оптический знак +, знак удлинения +; б) — оптический знак —, знак удлинения —.

изометричные очертания и в скрещенных николях кажутся темными.

Знак удлинения в таких кристаллах определить нельзя. Наоборот, кристаллы призматического облика почти все будут ложиться на

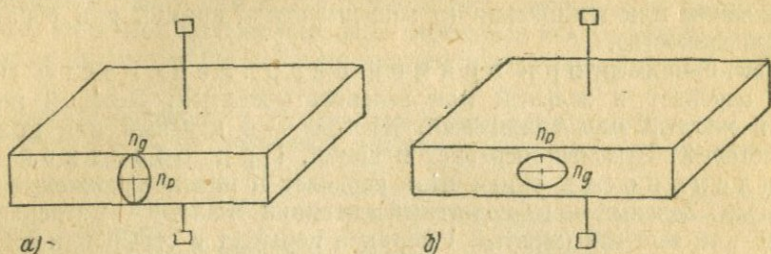


Рис. 65. Таблитчатые одноосные кристаллы. Оптический знак кристалла и знак удлинения на грани призмы противоположны: а) — оптический знак +, знак удлинения —; б) — оптический знак —; знак удлинения +.

предметное стекло гранью призмы и обнаруживать знак удлинения, совпадающий с оптическим знаком кристалла.

В иммерсионных препаратах знак удлинения ограниченных одноосных кристаллов совпадает с их оптическим знаком.

В кристаллах низших сингоний такая закономерность отсутствует. Здесь знак удлинения зависит лишь от ориентировки индикатрисы относительно направления вытянутости кристалла. Если с этим направлением совпадает ось n_g — знак удлинения +. Если с ним совпадает n_p — знак удлинения —. Если же с удлинением кристалла совпадает ось n_m , то знак удлинения будет меняться в зависимости от того, на какой из боковых граней лежит кристалл (рис. 66).

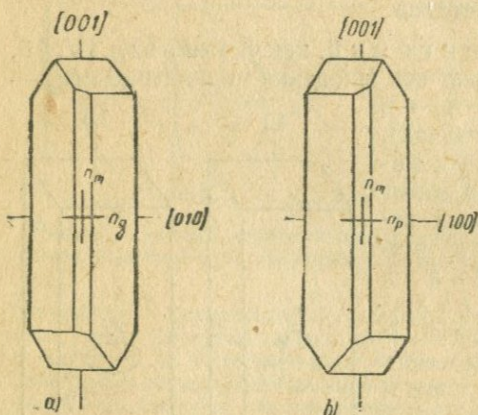


Рис. 66. Кристаллы $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (ромбическая сингония), вытянутые по оси [001], с которой совпадает ось n_m : а) — кристалл лежит на грани (100), знак удлинения —; б) — кристалл лежит на грани (010), знак удлинения +.

одного и того же вещества различен, кристаллы, несомненно, двуосны, и с их удлинением совпадает ось n_m .

Все сказанное здесь относительно знака удлинения ограниченных кристаллов применимо и к закрученным кристаллам (например,

зерна минералов в песках), если у них сохранилось направление вытянутости.

В петрографических шлифах переменный знак удлинения может наблюдаться также и в том случае, если ось n_m перпендикулярна к удлинению таблитчатых кристаллов. Пример — гипс (моноклинная сингония), у которого ось n_m перпендикулярна к плоскости спайности.

Глава VIII КОНОСКОПИЯ

(ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ)

§ 1. Принцип метода

В главе III, § 1, знакомясь с микроскопом, мы рассмотрели ход конуса лучей, исходящих из какой-либо точки предмета и дающих в плоскости изображения (несколько ниже глазной линзы окуляра) изображение данной точки. Рассмотрим теперь ход лучей, вышедших из разных точек предмета, но идущих параллельно друг другу.

Лучи, идущие вертикально (параллельно оси объектива), собираются в одну точку в верхнем главном фокусе объектива. Косые относительно оси объектива, но параллельные друг другу лучи сходятся в некоторой точке, лежащей в верхней фокальной плоскости объектива. Эта точка тем дальше отстоит от главного фокуса, чем больше наклон соответствующих ей лучей (рис. 67).

Таким образом каждая точка верхней фокальной плоскости объектива соответствует серии лучей, параллельных какому-либо одному направлению. Если николи скрещены и на столике микроскопа лежит кристалл, то каждая точка этой плоскости будет обнаруживать эффект двупреломления, обусловленный лучами, прошедшими через кристалл по какому-либо определенному направлению. В результате в верхней фокальной плоскости объектива будет видна так называемая коноскопическая фигура.

По виду коноскопической фигуры можно судить об осности кристалла, о величине угла оптических осей, о том, с каким сечением кристалла мы имеем дело, и с помощью простых испытаний, можно определить оптический знак кристалла.

Изучение оптических свойств кристаллов при помощи коноскопических фигур и составляет сущность коноскопического метода.

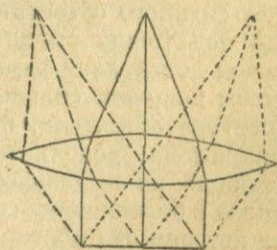


Рис. 67. Схема образования коноскопической фигуры в верхней фокальной плоскости объектива.

§ 2. Получение и наблюдение коноскопических фигур

При обычной (ортоскопической) установке микроскопа мы не видим фигуру, получающуюся в верхней фокальной плоскости объектива, так как она лежит гораздо ниже плоскости изображения. Чтобы ее увидеть, надо вынуть окуляр и смотреть в тубус микроскопа при одном объективе. В этом случае мы видим непосредственно над объективом коноскопическую фигуру в ее натуральную величину. В увеличенном виде можно наблюдать эту фигуру при помощи линзы Бертрана, которая имеется почти во всех современных поляризационных микроскопах. Эта линза расположена над анализатором и при ортоскопическом наблюдении выдвинута из тубуса. Для наблюдения коноскопической фигуры в увеличенном виде надо, не вынимая окуляра, вдвинуть линзу Бертрана. При этом окуляр вместе с линзой Бертрана образует слабый микроскоп, сфокусированный на верхнюю фокальную плоскость объектива и дающий обратное увеличенное изображение коноскопической фигуры.

При коноскопическом исследовании мы заинтересованы в том, чтобы фигура была образована по возможности более широким конусом лучей. Поэтому слабые, низкоапертурные объективы, которыми захватываются только лучи, идущие почти параллельно оси микроскопа, для коноскопии непригодны. Следует пользоваться сильными, высокоапертурными системами, например объективами № 6 или № 7, или объективом $60\times 00M3$, дающими угловой охват около 116° . При применении такого сильного объектива «узким местом» системы окажется расположенный под столиком микроскопа осветительный аппарат, дающий обычно пучок лучей, лишь немного отличающийся от параллельного. Поэтому, чтобы получить сильно расходящийся пучок лучей, соответствующий апертуре объектива, необходимо ввести непосредственно под столик микроскопа дополнительный конденсатор (линзу Лазо), состоящий из небольшой, сравнительно короткофокусной линзы. Эта линза в большинстве систем включается небольшим поворотом рычага, на котором она смонтирована. Само собой разумеется, что расположенная под линзой Лазо диафрагма, ограничивающая апертуру конуса лучей, должна быть полностью открыта.

Схема получения коноскопической фигуры.
Для получения коноскопической фигуры необходимо:

- 1) выбрать объект и поставить его в центр поля зрения (обычно при слабом или среднем увеличении);
- 2) поставить сильный объектив, сфокусировать и центрировать микроскоп;
- 3) ввести линзу Лазо и полностью открыть диафрагму;
- 4) не вынимая окуляр, ввести линзу Бертрана, или не вводя линзу Бертрана, вынуть окуляр;
- 5) проверить равномерность освещения поля зрения коноскопа (см. ниже);
- 6) ввести анализатор.

Дополнительные замечания: а) Как будет видно из дальнейшего, наблюдения коноскопических фигур производится при вращении столика микроскопа. Поэтому последний должен быть центрирован настолько, чтобы исследуемый кристалл при вращении не покидал центра поля зрения. Чем меньше этот кристалл, тем тщательнее должна быть произведена центровка.

б) Рассматривая фигуру без окуляра, желательно пользоваться накладной диафрагмой (кружок с маленьким круглым отверстием в центре — около 1 мм в диаметре или меньше), которая вставляется на место окуляра. Эта диафрагма обеспечивает правильное положение глаза наблюдателя (на продолжении оптической оси объектива). Особенно необходима эта диафрагма при малых объектах, так как в этом случае, при незначительном смещении глаза в сторону, фигура перестает быть видимой.¹ Если вблизи исследуемого маленького зерна находятся другие кристаллы, исследователь рискует, ведя наблюдение без накладной диафрагмы, получить фигуры от этих соседних кристаллов вместо фигуры от центрального зерна.

в) Наблюдение с линзой Бертрана, вообще говоря, дает хорошие результаты при достаточной величине зерна или при отсутствии в непосредственном соседстве других зерен. Пределы применения линзы Бертрана могут быть расширены; если пользоваться монтированной с нею ирисовой диафрагмой (такой диафрагмой снабжены все современные большие модели). Эта диафрагма сужает поле зрения и позволяет устранить лучи, идущие от кристаллов, расположенных вблизи центрального. Минимальные размеры зерна, фигуру которого можно таким образом изолировать, составляют при объективах №№ 6 и 7 соответственно 0,016 и 0,012 мм в диаметре. Иногда к микроскопу прилагается особая вспомогательная лупа, насаживающаяся на окуляр. С помощью этой лупы можно наблюдать поле зрения при включенной линзе Бертрана и непосредственно видеть, какая часть поля остается открытой при минимальном отверстии диафрагмы (впрочем, эта лупа при обычной работе не является существенно необходимым приспособлением).

г) Для наведения на резкость коноскопической фигуры линза Бертрана обычно снабжена приспособлением, позволяющим передвигать ее вверх и вниз в тубусе микроскопа. В малых моделях, где возможность такой фокусировки отсутствует, положение линзы Бертрана рассчитано для какого-либо одного окуляра, в комбинации с которым она и дает достаточно отчетливую фигуру.

д) При коноскопической установке микроскопа всякие неоднородности в источнике света проектируются в поле зрения и, накладываясь на коноскопическую фигуру, мешают наблюдению. Поэтому необходимо пользоваться матовой электrolампочкой, или закрывать лампочку матовым стеклом или восковой, или пользоваться маленьким круглым матовым стеклышком, которое вкладывается в нижнее отверстие осветительного аппарата микроскопа и укрепляется при помощи капли глицерина.

Во всех случаях, перед началом работы, следует проверить однородность освещения поля, выдвинув анализатор и введя линзу Бертрана (или вынув окуляр). Поле зрения при этом должно быть равномерно освещенным. Если в поле зрения видны какие-либо тени, то при условии однородности источника света они указывают на неправильное положение зеркала.

§ 3. Коноскопия одноосных кристаллов

В одноосных кристаллах, рассматриваемых под микроскопом, оптическая ось может быть либо перпендикулярна к плоскости столика микроскопа, либо параллельна ей, либо расположена косо относительно ее. Соответственно имеем три типа разрезов, каждый из которых характеризуется определенной коноскопической фигурой.

¹ С накладной диафрагмой при благоприятных условиях можно получать коноскопическую фигуру даже для зерен 0,007—0,010 мм в поперечнике.

Для вывода коноскопических фигур, возможных в одноосных кристаллах, предварительно докажем следующую теорему.

При прохождении света через одноосный кристалл колебания одной волны (необыкновенной) совершаются всегда в плоскости главного сечения,¹ а другой (обыкновенной) — перпендикулярно к этой плоскости.

Для доказательства проведем плоскость чертежа (рис. 68) через главное сечение, т. е. так, чтобы оптическая ось AA и направление произвольно взятой нами нормали RR лежали бы в плоскости чертежа. Круговое сечение (CC) индикатрисы будет при этом расположено нормально к чертежу. По правилу индикатрисы колебания будут совершаться по осям эллипса, который получится при пересечении ин-

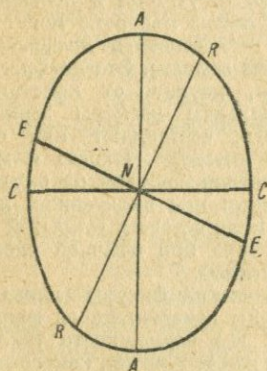


Рис. 68.

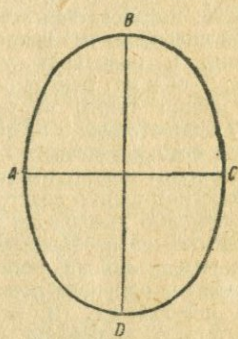


Рис. 69.

дикатрисы с плоскостью, перпендикулярной к нормали. Этот эллипс — EE — также будет нормален к плоскости чертежа и пересечет круговое сечение по его вертикальному диаметру N .

Каждый диаметр кругового сечения, представляя собой ось симметрии второго порядка для всего эллипсоида, является такой же осью для любого сечения, проходящего через этот диаметр. Следовательно, диаметр кругового сечения N , присутствующий в эллипсе EE , явится для этого эллипса осью симметрии. Второй осью симметрии эллипса, перпендикулярной к оси N , будет линия пересечения нашего эллипса с плоскостью чертежа, т. е. линия EE .

Следовательно, одно колебание будет совершаться по диаметру кругового сечения N , расположенному перпендикулярно к главному сечению, а другое — по направлению EE , лежащему в плоскости главного сечения.

¹ Главным сечением индикатрисы называется плоскость, проведенная через направление нормали к волне, распространяющейся в кристалле, и оптическую ось кристалла.

При любом направлении светового луча одним из направлений колебаний явится какой-либо из диаметров кругового сечения, а так как все диаметры круга равны, то, следовательно, независимо от направления распространения света, показатель преломления для одной волны будет оставаться постоянным. Эта волна, колебания которой совершаются по диаметру кругового сечения, перпендикулярному к главному сечению, есть волна обыкновенная. Необыкновенная волна колеблется в плоскости главного сечения.

Другое доказательство этой теоремы.

Пусть свет распространяется перпендикулярно к чертежу. Эллипс, получаемый по правилу индикатрисы, в данном случае будет лежать в плоскости чертежа (рис. 69). Колебания совершаются по осям этого эллипса. Надо доказать, что одна из этих осей является диаметром кругового сечения индикатрисы, а другая лежит в плоскости главного сечения.

Диаметр кругового сечения является либо наиболее длинным диаметром индикатрисы (у отрицательных кристаллов), либо — наиболее коротким (у положительных). Следовательно, линия пересечения кругового сечения с любым эллиптическим будет либо самым длинным, либо самым коротким диаметром данного эллиптического сечения, т. е. одной из его осей. Таким образом одна из осей эллипса $ABCD$ является диаметром кругового сечения. Примем, для определенности, что это ось AC . Остается доказать, что ось BD лежит в плоскости главного сечения.

Проведем через BD вертикальную плоскость. Эта плоскость перпендикулярна оси AC , следовательно в ней должна находиться оптическая ось, которая перпендикулярна к AC , как к одному из диаметров кругового сечения. В ней же находится и световая нормаль, перпендикулярная к плоскости чертежа. Таким образом, эта плоскость, в которой лежит BD , является главным сечением.

а. Разрез, перпендикулярный к оптической оси одноосного кристалла

Пусть на столике микроскопа лежит одноосный кристалл, ориентированный оптической осью перпендикулярно к столику. В параллельном свете в скрещенных николях такой кристалл будет темным и при вращении столика не будет просветляться.

В сходящемся свете такой кристалл дает весьма характерную фигуру, состоящую из темного креста, ветви которого, расширяющиеся к концам, параллельны главным сечениям николей. В поле между ветвями креста видны концентрические кольца интерференционных цветов, повышающихся от центра к периферии фигуры (рис. 70).

При вращении столика никаких изменений не наблюдается.

Появление данной фигуры объясняется следующим.

Лучи, идущие параллельно оптической оси и не испытывающие поэтому двупреломления, собираются объективом в одну точку в центре поля зрения (так как в нашем случае оптическая ось совпадает с осью оптической системы микроскопа). В этой точке при скрещенных николях должна быть темнота. Во всех других точках поля зрения микроскопа соберутся лучи, наклоненные к оптической оси, причем чем больше угол наклона лучей, тем дальше от центра фигуры будет находиться соответствующая им точка.

Каждая волна, идущая не по оптической оси, должна разложиться на две волны, разность хода между которыми определит высоту интерференционной окраски в соответствующем месте фигуры. Чем больший угол делают нормали с оптической осью, тем больше перпендикулярные к ним эллиптические сечения индикатрисы отличаются от кругового и тем выше, следовательно, будет двупреломление. Этим объясняется повышение интерференционной окраски от центра к периферии фигуры. Кроме того, чем больше угол наклона лучей, тем больший путь проходят они в плоскопараллельной пластинке, что также влияет на высоту интерференционной окраски.

Появление черного креста объясняется следующим. В каждой точке фигуры (кроме центра) мы имеем два колебания — одно, соответствующее волне обыкновенной (o), другой — необыкновенной (e).

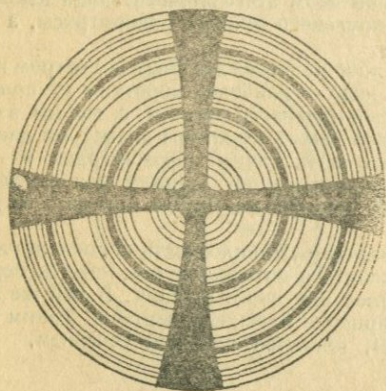


Рис. 70. Коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси.

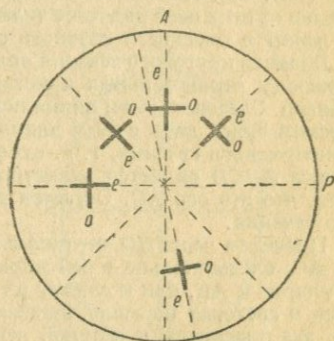


Рис. 71. Направления колебаний в некоторых точках коноскопической фигуры разреза, перпендикулярного к оптической оси одноосного кристалла.

Волна e , как показано выше, должна колебаться в плоскости главного сечения, а волна o — перпендикулярно к этой плоскости. Плоскости главных сечений, как проходящие через оптическую ось (выходящую в центре фигуры), будут проектироваться по радиусам фигуры, и, следовательно, колебания в разных ее точках будут совершаться по разным направлениям (рис. 71).

Два главных сечения P и A параллельны направлениям колебаний николей. Во всех точках, лежащих в этих главных сечениях, направления колебаний совпадают с направлениями колебаний в николях, и, следовательно, эти точки должны находиться на погасании. Этим и объясняется появление черного креста, совпадающего с главными сечениями николей. Во всех остальных точках фигуры будет просветление и тем более интенсивное, чем больший угол делают направления колебаний с главными сечениями николей. Максимум освещенности будет в точках, лежащих на диаметрах фигуры, расположенных под 45° к главным сечениям николей.

в. Влияние толщины кристалла и силы двупреломления

Чем толще исследуемое зерно, тем большую разность хода при прочих равных условиях приобретают проходящие через него косые лучи и тем быстрее будет повышаться интерференционная окраска от центра к периферии фигуры. Поэтому в толстых зернах видно больше цветных колец, чем в тонких, а так как видимый размер коноскопической фигуры при данной оптической системе есть величина постоянная, кольца эти в толстых зернах более узкие и расположены теснее, чем в тонких. Аналогично сказывается и влияние силы двупреломления. При равной толщине сильно двупреломляющие кристаллы дают больше цветных колец, чем слабо двупреломляющие.

Тонкие пластинки слабо двупреломляющих минералов (например, псевдоодноосные хлориты в иммерсионных препаратах) дают фигуру, в которой темные ветви креста очень широки и занимают почти все поле зрения, и только на краях поля зрения в диагональных квадрантах заметно слабое просветление. В петрографических шлифах большинство минералов дает фигуру, в периферических частях которой окраска не подымается выше желтой I порядка, а все поле между ветвями креста окрашено в серый и белый цвета I порядка, и лишь для сильно двупреломляющих наблюдаются кольца более высоких интерференционных цветов.

В иммерсионных препаратах при большой толщине зерен цветные кольца наблюдаются чаще.

По высоте окраски, наблюдаемой в коноскопической фигуре, по степени четкости или расплывчатости темного креста можно, учитывая толщину пластинок, получить суждение о силе двупреломления вещества.¹

с. Влияние объектива

Следует различать видимые размеры коноскопической фигуры, определяемые диаметром поля зрения коноскопа, и ее коноскопический охват, т. е. максимальный наклон лучей, попадающих в поле зрения коноскопа.

Слабые объективы дают фигуру больших размеров, чем сильные. Однако, как указывалось выше (гл. VIII, § 2), слабые объективы пропускают пучок лучей, мало отличающийся от параллельного, и коноскопический охват поля их незначителен. Поэтому чем сильнее объектив, тем меньше видимые размеры фигуры, но тем тоньше кажутся черные ветви креста и цветные кольца и тем больше колец помещается в поле зрения.

Все сказанное здесь о влиянии толщины зерна, силы двупреломления и коноскопического угла объектива с соответственными изменениями будет справедливо и в отношении фигур других разрезов, описываемых ниже.

¹ Это может быть использовано как диагностический признак, чтобы отличать, например, псевдоодноосные слюды от таких же хлоритов в иммерсионных препаратах, где все пластинки этих минералов, благодаря спайности, ориентированы по изотропному сечению.

В дальнейшем (за исключением специально оговариваемых случаев) будет описываться вид фигур при объективах $60\times$ и №№ 6 и 7.

d. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси одноосного кристалла

В одноосных положительных кристаллах показатель преломления для обыкновенной волны меньше, чем для необыкновенной — $n_o < n_e$. В отрицательных имеем обратное соотношение — $n_o > n_e$ (гл. IV, § 4).

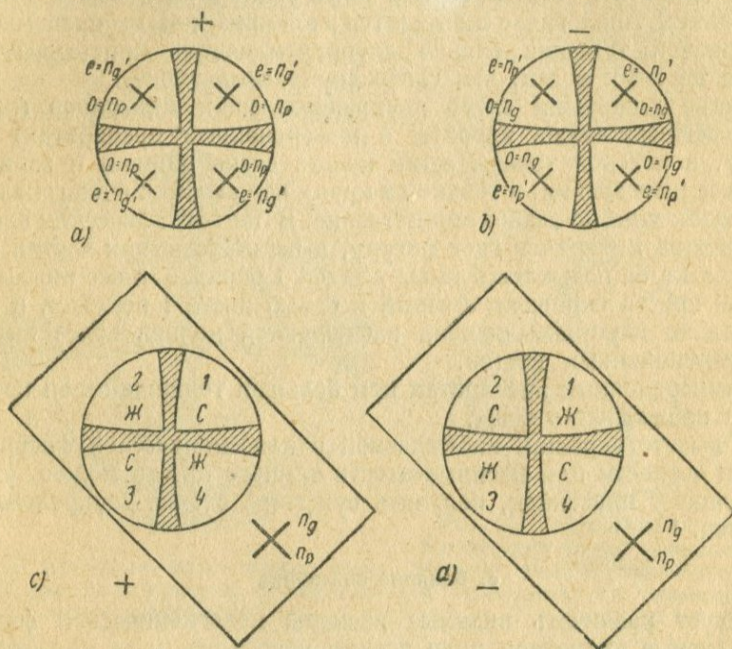


Рис. 72. Определение знака одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси при помощи гипсовой пластинки.

Как показано выше, колебания волны e совершаются по радиусам коноскопической фигуры, а волны o — перпендикулярно к ним. Вдвинув гипсовую пластинку, в двух квадрантах коноскопической фигуры будем иметь прямую параллельность, в двух других — обратную. Если по длине гипсовой пластинки лежит n_p и если считать номера квадрантов, как показано на рис. 72, c и d , то в положительных кристаллах прямая параллельность будет иметь место в 1 и 3 квадрантах, а обратная во 2 и 4 (рис. 72, a и c). В отрицательных — наоборот (рис. 72, b и d).

Те части фигуры, которые без пластинки имели интерференционную окраску белую I порядка, при прямой параллельности, как всегда, приобретут окраску синюю или зеленую II порядка (c), а при обратной параллельности — желтую I порядка ($ж$) (рис. 72, c и d).

В случае кристалла, обладающего большим двупреломлением, когда в поле зрения коноскопа виден ряд concentрических цветных колец, следует помнить, что гипсовая пластинка дает четкие результаты только при малой разности хода в кристалле (гл. VII, § 5). Поэтому, вдвигая пластинку, надо обращать внимание на изменение окраски в той части поля, где без пластинки были низкие цвета I порядка, а именно, внутри ближайшего к выходу оптической оси цветного круга. В этом же случае, когда видно несколько цветных колец, можно определять знак кристалла также с помощью кварцевого клина или компенсатора Берека (гл. VII, § 4), определяя прямую и обратную параллельность по методу бегущих полосок. При вдвигании клина тонким концом вперед, в тех квадрантах, где имеет место прямая параллельность, concentрические цветные кольца будут сжиматься и двигаться

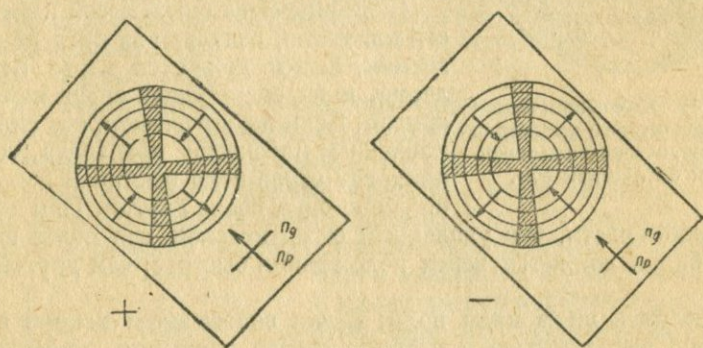


Рис. 73. Определение знака одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси при помощи кварцевого клина.

по направлению к центру (к выходу оптической оси), в тех же квадрантах, где параллельность обратная, кольца будут расширяться и двигаться от центра к периферии. Это непосредственно вытекает из общего правила, что при прямой параллельности высокие цвета переходят на место низких, а при обратной — низкие на место высоких (гл. VII, § 4).

На рис. 73 представлено движение колец в случае положительного и отрицательного кристаллов при условии, что клин имеет обычную ориентировку (по длине n_p). Если пользоваться компенсатором Берека, то передвижение цветных колец в случае положительного и отрицательного кристалла будет обратное показанному на рисунке, так как по длине компенсатора расположено не n_p , а n_g .

е. Косой разрез одноосного кристалла

Если оптическая ось кристалла не строго перпендикулярна к плоскости препарата, а наклонена под небольшим углом, выход ее будет проектироваться не в центре поля зрения коноскопа, а несколько в стороне, и вся фигура будет несколько смещена. Ветви креста при этом останутся параллельными направлениям колебаний в николях

(рис. 74). При вращении столика микроскопа оптическая ось в этом случае не останется неподвижной, а будет описывать конус вокруг оси столика. В коноскопической фигуре выход оптической оси (центр креста) будет при этом двигаться по окружности вокруг центра поля зрения. Ветви креста будут перемещаться, оставаясь параллельными своему первоначальному положению.

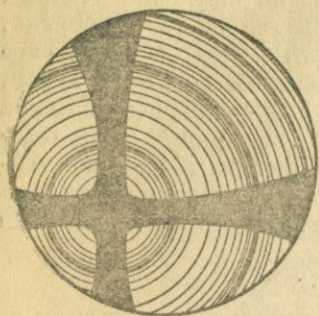


Рис. 74. Коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, немного наклоненном к оптической оси.

При большем наклоне оптической оси центр черного креста будет смещен за пределы поля зрения коноскопа. При вращении столика, через поле зрения будут по очереди проходить горизонтальная и вертикальная балки креста (рис. 75).

Если разрез не очень косой и центр креста находится недалеко за пределами поля зрения, балки движутся через поле медленно, и на смену одной сразу появляется другая. Если же оптическая ось сильно наклонена к плоскости препарата, то балки проходят через поле быстро и появляются не скоро одна после другой. При этом часто можно видеть, что удаленный от оптической оси более широкий конец балки движется через поле зрения быстрее, чем другой, более узкий.

Появляясь из-за края поля, балка оказывается искривленной и обращена выпуклостью в сторону своего движения, проходя через

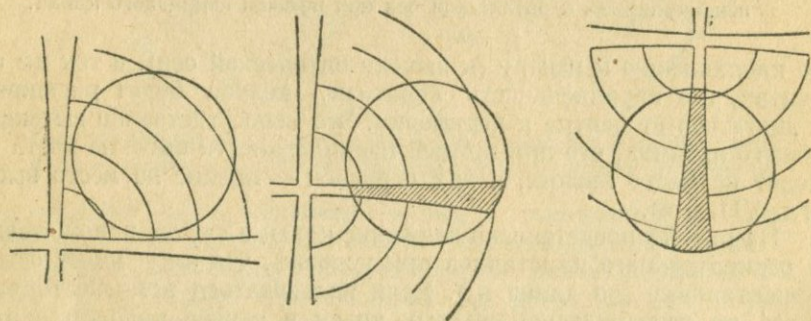


Рис. 75. Коноскопическая фигура косого разреза одноосного кристалла. Центр черного креста (выход оптической оси) за пределами поля зрения. При вращении столика балки креста поочередно проходят через поле зрения.

середину, она выпрямляется и становится симметричной. Покидая поле зрения, она изгибается в противоположную сторону (рис. 76).

В очень косых разрезах, когда оптическая ось почти параллельна столику микроскопа, балка оказывается уже не черной, а серой и широкой, занимающей иногда почти все поле зрения. Она очень быстро пробегает через поле при вращении столика и сильно искривляется.

1. Определение знака одноосного кристалла в косом разрезе

Если разрез лишь немного косой и оптическая ось находится в пределах поля зрения коноскопа, то видны одновременно все 4 квадранта темного креста и определение знака производится так же, как и в случае разреза, перпендикулярного к оптической оси.

Если выход оптической оси, т. е. центр темного креста, лежит за пределами поля зрения, то все 4 квадранта нельзя наблюдать одновременно. Мы видим два из них, когда темная балка проходит через поле зрения и только один, — когда обе темные балки находятся за пределами поля.

При вращении столика каждый из квадрантов по очереди оказывается в поле зрения. Из рис. 72 видно, что для определения знака нет необходимости наблюдать все 4 квадранта. Чтобы определить, имеем ли мы дело со случаем $n_o < n_e$ (+) или $n_o > n_e$ (—), достаточно произвести соответствующее исследование в каком-либо

одном квадранте. Нужно лишь знать, с каким именно квадрантом мы имеем дело. Зная же квадрант, мы тем самым знаем, в какой стороне находится выход оптической оси и, следовательно, знаем направления колебаний волн o и e .

Чтобы узнать, какой квадрант коноскопической фигуры находится в данный момент в поле зрения, надо выяснить, где находятся в этот момент вертикальная и горизонтальная балки. Для этого надо вращать столик, пока из-за края поля не покажется балка. Пусть, например, показалась вертикальная балка с левого края поля. Теперь вращаем столик в обратную сторону. Вертикальная балка опять уйдет налево, и вскоре вместо нее появится горизонтальная балка, допустим, с верхнего края. Следовательно, вертикальная балка находится слева от поля, а горизонтальная балка — наверху. Очевидно, в этом случае в поле зрения находится четвертый квадрант (рис. 77).

Находить, какой квадрант в каждый момент лежит в поле зрения, можно и иначе. Для этого введем понятие о сопутствующем и встречном концах балки. Конец балки, перемещающийся в направлении

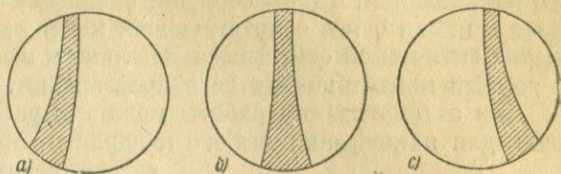


Рис. 76. Сильно косой разрез одноосного кристалла. Искривление балки темного креста при приближении к краю поля зрения.

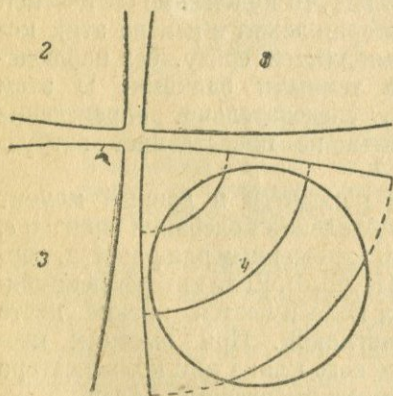


Рис. 77.

вращения столика, назовем сопутствующим, а перемещающийся против направления вращения столика назовем встречным (рис. 78). Легко понять, что сопутствующим будет конец балки, расположенный ближе к оптической оси, так как выход оптической оси, находящийся за пределами поля зрения, при вращении столика перемещается в том же направлении. Таким образом, наблюдая прохождение балки через поле и найдя у нее сопутствующий конец, мы узнаем, где находится выход оптической оси, а следовательно и выясняем, какие квадранты в данный момент находятся в поле зрения.

Для автоматизации работы можно выработать определенные правила для нахождения любого квадранта. Можно, например, пользоваться следующим правилом. Когда при вращении столика по часовой стрелке вертикальная балка уйдет направо, в поле зрения будет третий квадрант.

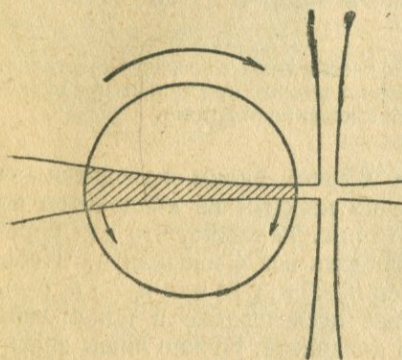


Рис. 78. При вращении столика по часовой стрелке горизонтальная балка идет вниз. Правый конец — сопутствующий, левый — встречный. Выход оптической оси справа за пределами поля зрения.

Соответственно изменив формулировку, можно получить подобные правила для нахождения и других квадрантов.

Наконец, если интерференционная окраска высока и в коноскопической фигуре видны концентрические цветные кольца, то положение оптической оси, которая лежит в центре этих колец, выясняется сразу, без наблюдения за темными балками. В этом случае, следовательно, определение квадранта не представляет затруднений.¹

Выяснив, какой квадрант фигуры находится в данный момент в поле зрения и, следовательно, зная направление колебаний волн o и e , определяют знак кристалла по правилам, изложенным для разреза, перпендикулярного к оптической оси (гл. VIII, §3, d). Если интерференционная окраска не высока и в пределах поля имеются низкие цвета I порядка, пользуются гипсовой пластинкой. При высоких цветах определяют знак при помощи кварцевого клина или компенсатора Берека, наблюдая движение концентрических цветных колец.

Рекомендуется, определяя знак, ограничиваться не одним квадрантом, а по крайней мере двумя; при этом надо брать квадранты четный и нечетный, чтобы наблюдать явления как при прямой, так и при обратной параллельности.

Практические замечания: 1) Иногда рекомендуется определять знак, поставив темную балку посреди поля зрения. При этом в поле

¹ Определение квадранта в косом разрезе одноосных кристаллов на практике настолько просто, что вполне можно было бы ограничиться здесь изложением лишь одного какого-либо способа. Однако, как увидим дальше, в двуосных кристаллах дело обстоит сложнее, и там все эти способы пригодятся.

видны одновременно два квадранта, из которых в одном наблюдается прямая, а в другом обратная параллельность с вводимым компенсатором. Следует заметить, что этот способ применим лишь в том случае, если разрез не очень косой и выход оптической оси находится недалеко за пределами поля зрения. При более косом разрезе, если балку поставить посреди поля, то в светлых квадрантах направления колебаний образуют не 45° с главными сечениями николей, а значительно меньшие углы (рис. 79, а). Поэтому условие параллельности колебаний в кристалле и компенсаторе не будет соблюдено, и мы увидим лишь интер-

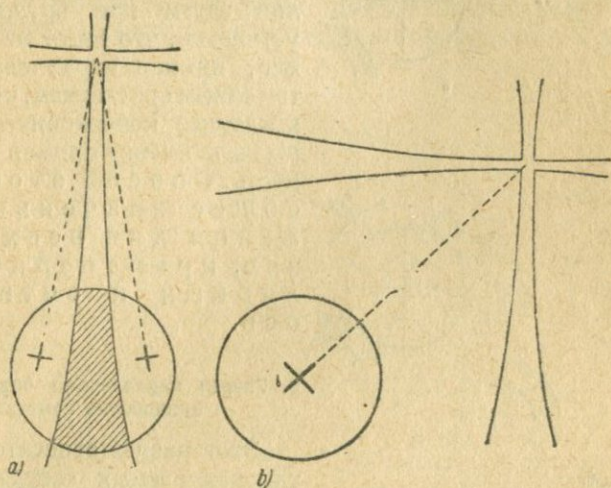


Рис. 79. Если балка находится в поле зрения, то при сильно косом разрезе направления колебаний в точках коноскопической фигуры и в пробной пластинке не параллельны (а). Для достижения параллельности необходимо повернуть столик так, чтобы обе балки оказались на одинаковом расстоянии от краев поля зрения (б).

ференционную окраску самой гипсовой пластинки (или иного компенсатора). Иногда оказывается даже недостаточным просто вывести балку за пределы поля, а нужно, вращая столик в обе стороны, выяснить положение второй балки и расположить обе балки симметрично относительно поля зрения. Только в этом случае направления колебаний в поле зрения будут лежать под углом 45° к нитям окулярного креста (рис. 79, б).

2) Иногда, особенно при работе с иммерсионными препаратами, интерференционная окраска фигуры настолько высока, что не удается установить, имеет ли место прямая или обратная параллельность. В этом случае нужно, поставив в поле определенный квадрант, перейти от коноскопической установки микроскопа к ортоскопической (убрать линзу Бертрана или вставить окуляр, прикрыть диафрагму) и определять параллельность уже на самом кристалле (не поворачивая столик). В большинстве случаев это удается, так как при ортоскопической установке интерференционные цвета видны более четко. Кроме того,

часто на краю кристалла, где он тоньше (в иммерсионном препарате), видны более низкие цвета, на которых параллельность устанавливается без труда.

Способ этот основан на том, что изображение кристалла в ортоскопической установке дают те самые лучи, которые образуют середину поля зрения при коноскопической установке. Следовательно, поставив в поле зрения коноскопа, хотя бы третий квадрант и определив затем при ортоскопической установке, что имеет место, например, прямая параллельность, мы тем самым определяем, что в третьем квадранте коноскопической фигуры была именно прямая параллельность. Способ этот имеет общее значение и применим для всех разрезов, кроме перпендикулярных к оптической оси.

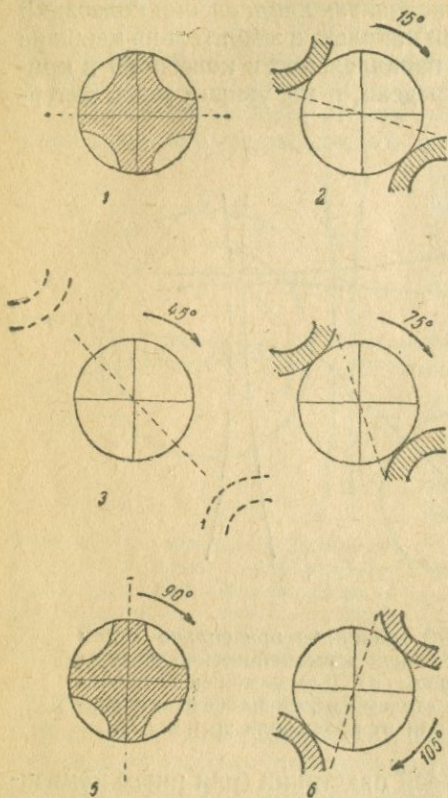


Рис. 80. Коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, параллельном оптической оси (пунктирная линия — направление оптической оси).

Этот разрез относится к числу так называемых «неудобных» разрезов и обычно при исследовании минералов в петрографических шлифах не используется для определения осности и знака. Как увидим ниже, в иммерсионных препаратах этот разрез встречается очень часто и имеет весьма большое значение. Поэтому мы остановимся на нем несколько подробнее.

¹ Ветви гиперболы часто видны неотчетливо и кажутся неясными серыми пятнами.

g. Разрез параллельно оптической оси одноосного кристалла

Вращая столик, мы можем совместить оптическую ось с направлением колебаний в каком-либо из николей. В тот момент, когда это совпадение будет иметь место, в поле зрения коноскопа будет видна неясная фигура, состоящая из широкого серого креста, занимающего своей центральной частью почти все поле зрения. Только на краях поля в диагональных квадрантах может наблюдаться некоторое просветление (рис. 80, 7 и 5). При повороте столика крест распадается на две ветви гиперболы, ¹ которые быстро уходят в противоположные квадранты,

Вращая столик, мы можем совместить оптическую ось с направлением колебаний в каком-либо из николей. В тот момент, когда это совпадение будет иметь место, в поле зрения коноскопа будет видна неясная фигура, состоящая из широкого серого креста, занимающего своей центральной частью почти все поле зрения. Только на краях поля в диагональных квадрантах может наблюдаться некоторое просветление (рис. 80, 7 и 5). При повороте столика крест распадается на две ветви гиперболы, ¹ которые быстро уходят в противоположные квадранты,

а именно в те квадранты, в которые после поворота ложится оптическая ось. Достаточно повернуть столик на $12-15^\circ$, чтобы ветви гиперболы ушли за пределы видимости и все поле стало светлым (рис. 80, 2). При дальнейшем вращении, в некоторый момент ветви гиперболы снова возвращаются в поле зрения, и, когда оптическая ось совпадает с направлением колебаний второго николя, снова виден черный крест (рис. 80, 5). При дальнейшем повороте, гиперболы уходят в другие два квадранта (рис. 80, 6) и т. д.

Причину появления описанной фигуры проще всего уяснить, воспользовавшись особыми вспомогательными фигурами — с к и о д р о м а м и.

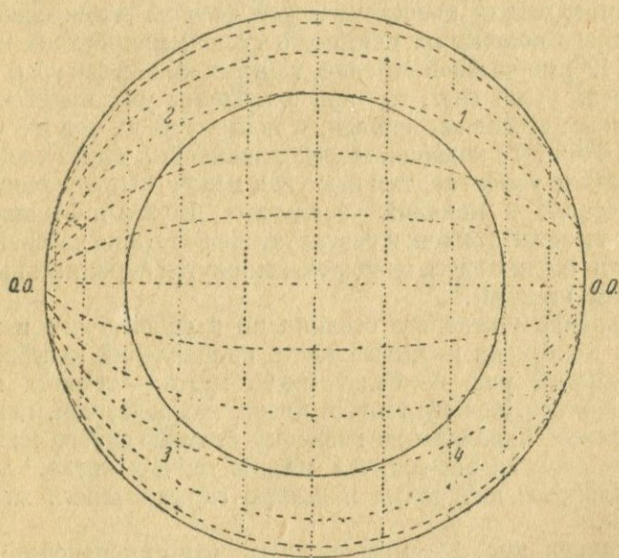


Рис. 81. Скиодромы одноосного кристалла в разрезе, параллельном оптической оси.

Для получения скиодром опишем вокруг оптической индикатрисы шар. Через каждую точку его поверхности будут проходить два луча eo взаимноперпендикулярными колебаниями. Нанесем на поверхности шара направления этих колебаний. Так как лучи необыкновенные колеблются в плоскостях главных сечений, то направления колебаний для них будут проектироваться на поверхности шара в виде меридиональных дуг, пересекающихся между собой в двух диаметрально противоположных точках, представляющих выходы оптической оси. Колебания обыкновенных лучей спроектируются в виде системы малых кругов, пересекающих меридианы под прямыми углами. Шар будет напоминать глобус с нанесенной сетью меридианов (колебания лучей e) и параллелей (колебания лучей o). Ортогональные проекции

этих линий с поверхности шара на плоскость и называются с к и о д р о м а м и.

На рис. 81 показаны скиодромы для разреза, параллельного оптической оси в тот момент, когда оптическая ось совпадает с горизонтальной нитью окулярного креста. Пунктирным кружком обведена часть чертежа, соответствующая коноскопическому полю сильного объектива (коноскопический угол — 116°).

Из чертежа видно, что во всех точках, не слишком удаленных от горизонтальной и вертикальной нитей окулярного креста, колебания совершаются параллельно или почти параллельно колебаниям в николях, и, следовательно, должна быть темнота. Только близ периферии диагональных квадрантов эта параллельность несколько нарушена. Поэтому в этих местах коноскопической фигуры виден слабый свет. Если из данного положения повернуть столик микроскопа на малый угол (около 10°) по часовой стрелке, то в тех частях фигуры, где была темнота, теперь будет свет, так как скиодромы уже будут не параллельны главным сечениям николей, а повернуты на тот же угол. На периферии 1-го и 3-го квадрантов, где раньше был виден слабый свет, теперь освещение усилится, так как угол между направлениями колебаний в кристалле и николях увеличится. Во 2-м и 4-м квадрантах теперь будет темнота, так как в результате поворота по часовой стрелке на малый угол именно здесь скиодромы окажутся параллельными главным сечениям николей.

При дальнейшем повороте столика ни в одной точке в пределах поля зрения коноскопа параллельность направлений колебаний кристалла и николей уже не будет иметь места — темнота исчезнет.

Отсюда понятно, почему темный крест, наблюдаемый, когда оптическая ось лежит параллельно главному сечению одного из николей, при повороте столика распадается на два темных пятна,¹ уходящие в противоположные квадранты и быстро скрывающиеся за пределы поля зрения.

Рассматривая рис. 81, можно видеть, что при повороте столика не по, а против часовой стрелки, темные пятна уйдут в 1-й и 3-й квадранты, так как теперь именно в этих квадрантах при повороте на некоторый небольшой угол направления колебаний совпадут с главными сечениями николей. Из этого же чертежа видно, что пятна при повороте столика уходят именно в те квадранты, в которые переходит при этом оптическая ось.

h. Определение знака в разрезе, параллельном оптической оси одноосного кристалла

Для определения знака в этом разрезе надо повернуть столик от положения темного креста на 45° , проследив при этом, в какие квадранты ушли темные пятна (ветви гиперболы). Через эти квадранты,

¹ Математический анализ показывает, что эти пятна должны иметь форму ветвей гиперболы.

как уже известно, проходит оптическая ось кристалла. Эта ось является осью n_z в положительных и n_p — в отрицательных кристаллах (гл. IV, § 4). Определение знака сводится к определению наименования этой оси при помощи гипсовой пластинки (рис. 82).

Если кристалл обладает высокой интерференционной окраской и имеет форму плоскопараллельной пластинки (шлиф), можно воспользоваться методом бегущих полос, применяя кварцевый клин или ком-

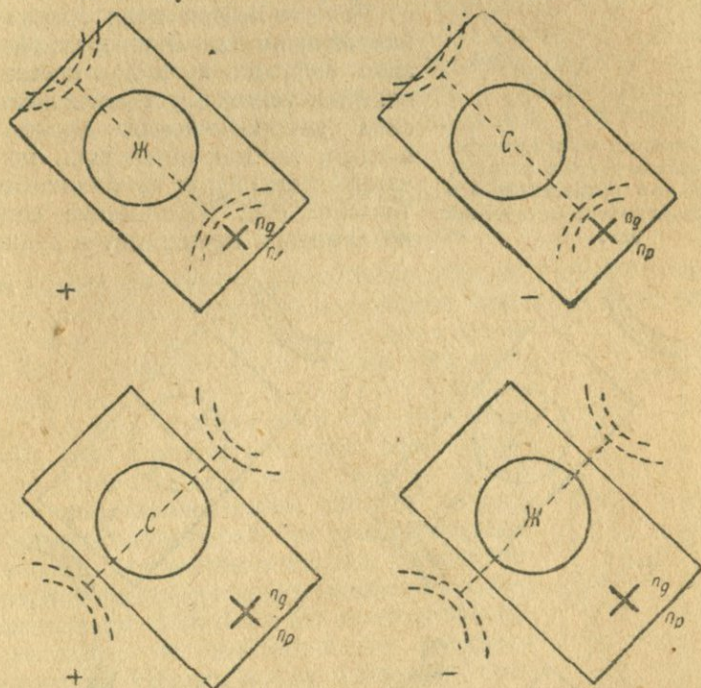


Рис. 82. Определение знака в разрезе, параллельном оптической оси при помощи гипсовой пластинки: С — прямая параллельность; Ж — обратная параллельность.

пенсатор Берека. Как всегда в таких случаях, надо заранее знать, в какой части фигуры находятся более низкие и в какой более высокие цвета.

Распределение цветов здесь следующее; центральная часть поля, где собираются лучи, идущие перпендикулярно и почти перпендикулярно к плоскости столика микроскопа, имеет такую же интерференционную окраску, какую имеет сам кристалл при ортоскопической установке микроскопа. Если от центра поля идти в направлении, перпендикулярном к оптической оси, то сила двупреломления для всех точек фигуры, лежащих в этом направлении, будет одна и та же, равная максимальной силе двупреломления данного вещества (так как все эти точки образованы лучами, идущими перпендикулярно

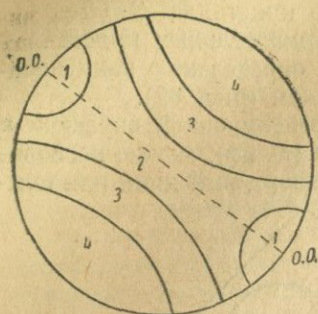


Рис. 83. Распределение интерференционных окрасок в разрезе, параллельном оптической оси (o.o. — направление оптической оси).

к оптической оси), но путь, проходимый в кристалле, для косых лучей больше, чем для лучей, перпендикулярных к плоскости препарата. Поэтому интерференционная окраска в направлении, перпендикулярном к оптической оси, от центра к периферии несколько повышается.

Если от центра поля зрения идти в направлении самой оптической оси, то здесь величина пути для косых лучей, конечно, также будет увеличиваться, но сила двупреломления будет уменьшаться, так как косые лучи по своему направлению будут приближаться к оптической оси. Уменьшение силы двупреломления происходит в данном слу-

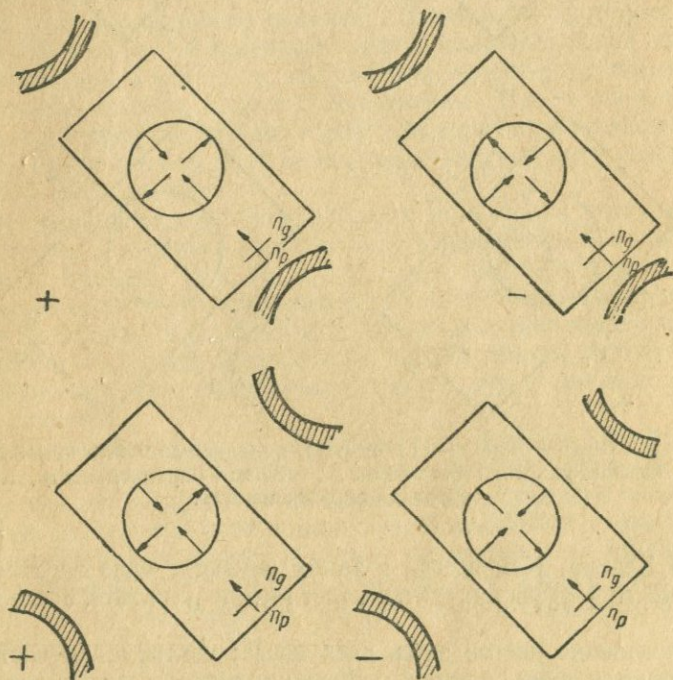


Рис. 84. Определение знака в разрезе, параллельном оптической оси при помощи кварцевого клина.

чае быстрее, чем увеличение пути.¹ В результате в направлении

¹ Если обозначим толщину кристалла d и его силу двупреломления D , то разность хода в центре фигуры будет $\Delta = Dd$. Для луча, делающего с нор-

оптической оси интерференционная окраска будет от центра к периферии понижаться¹ (рис. 83).

Поэтому при вдвигании кварцевого клина, в случае прямой параллельности, цвета в направлении, перпендикулярном к оптической оси будут перемещаться от краев к центру и расходятся к краям в направлении самой оптической оси. При обратной параллельности, наоборот, цвета будут сходиться к центру в направлении оптической оси и расходиться в перпендикулярном направлении (рис. 84).

Если исследуемое зерно не плоскопараллельно, что часто бывает в иммерсионных препаратах, описанной правильности в распределении интерференционных цветов не наблюдается. В этом случае для определения знака приходится переходить к ортоскопической установке микроскопа подобно тому, как описано в § 3, f этой главы.

§ 4. Коноскопия двuosных кристаллов

а. Теорема Френеля

Для вывода коноскопических фигур двuosных кристаллов предвзительно докажем следующее положение, известное под названием теоремы Френеля. В двuosных кристаллах световые колебания совершаются по биссектрисам углов между главными сечениями.

Пусть свет распространяется перпендикулярно к плоскости чертежа. Эллипс $ABAB$ (рис. 85) представляет собой сечение индикатрисы плоскостью чертежа. По правилу индикатрисы колебания в световых волнах, распространяющихся перпендикулярно к данному сечению, совершаются по осям AA и BB эллипса $ABAB$. Надо доказать, что оси AA и BB являются биссектрисами углов между главными сечениями.

Каждое сечение эллипсоида пересекается с обоими круговыми сечениями (кроме того частного случая, когда данное сечение само является одним из круговых).

Пусть CC и C_1C_1 — линии пересечения эллипса $ABAB$ с круговыми сечениями. $CC = C_1C_1$ как диаметры круговых сечений. Но в эллипсе

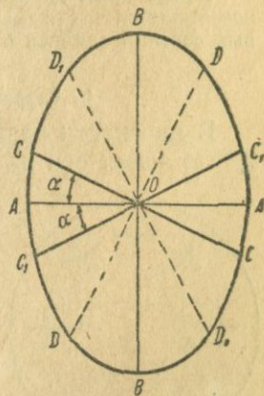


Рис. 85.

малю к кристаллической пластинке $\angle \alpha$ и наклоненного в сторону оптической оси, — величина пути $d_1 = \frac{d}{\cos \alpha}$, а сила дупреломления $D_1 = D \cos^2 \alpha$ (приближенная формула).

Следовательно, $\Delta_1 = D_1 d_1 = D \cos^2 \alpha \cdot \frac{d}{\cos \alpha} = Dd \cos \alpha < \Delta$.

¹ Распределением интерференционных окрасок можно пользоваться как признаком, указывающим направление оптической оси.

равными друг другу могут быть два направления лишь в том случае, если они расположены симметрично относительно осей эллипса. Следовательно, $\angle AOC = \angle AOC_1$ (обозначим — α), а $\angle BOC = \angle BOC_1$ (обозначим — β). Проведем плоскость DOD перпендикулярно к CC_1 . Эта плоскость есть геометрическое место всех прямых, перпендикулярных к CC_1 ; значит, в этой плоскости лежит и оптическая ось, которая, как нормаль к круговому сечению, перпендикулярна к диаметру кругового сечения CC_1 . Но кроме этого, в плоскости DOD лежит и нормаль к волне (нормаль по условию перпендикулярна к плоскости чертежа, плоскость DOD — та же), следовательно плоскость DOD является плоскостью главного сечения.

Аналогичным образом доказываем, что плоскость D_1OD_1 перпендикулярна к C_1C , также есть главное сечение. Прямые DD и D_1D_1 есть линии пересечения главных сечений с эллипсом $ABAB$. Но $\angle AOD = \angle BOC = \angle \beta$ и $\angle AOD_1 = \angle BOC_1 = \beta$, а $\angle BOD = \angle AOC = \alpha$ и $\angle BOD_1 = \angle AOC_1 = \alpha$.

Следовательно, оси эллипса $ABAB$, по направлениям которых совершаются световые колебания, являются биссектрисами углов между линиями пересечения главных сечений и плоскостью эллипса $ABAB$.

Примечание. Доказанная выше аналогичная теорема для одноосных кристаллов является частным случаем теоремы Френеля, при условии, что оба круговых сечения слились в одно, совпадающее с осью AA или BB .

в. Разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе

В плоскости разреза, перпендикулярного к $O. Б.$ (острой биссектрисе) лежат оси n_m и $T. Б.$ (тупая биссектриса). На рис. 86 нанесены, согласно теореме Френеля, направления колебаний этого разреза для момента, когда оси n_m и $T. Б.$ совпадают с направлениями колебаний николей. Из рисунка видно, что в этот момент во всех точках, расположенных на n_m и $T. Б.$, должна быть темнота, а во всех других точках — свет, т. е. получается фигура, напоминающая разрез, перпендикулярный к оптической оси одноосного кристалла.

Однако при повороте столика сходство нарушается. Крест не остается неподвижным, а распадается на две ветви гиперболы, которые при вращении столика расходятся в противоположные квадранты. На максимальное расстояние от центра ветви гиперболы отходят при повороте столика на 45° . В этот момент в вершинах гиперболы находятся выходы оптических осей.¹ Часто, но не всегда, при этом ветви гиперболы лежат еще в пределах

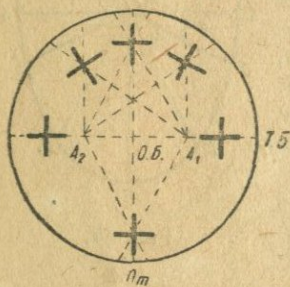


Рис. 86. Направления колебаний в разных точках разреза, перпендикулярного к острой биссектрисе: A_1 и A_2 — выходы оптических осей; пунктирные линии — главные сечения; крестики — направления колебаний.

¹ Выходы оптических осей, перемещаясь при вращении столика, все время находятся на гиперболе, совпадая с ее вершинами при повороте на 45° .

поля зрения коноскопа. При дальнейшем вращении столика ветви гиперболы начинают сближаться и при повороте на 90° от первоначального положения снова образуют крест, а затем расходятся в другие два квадранта.

Ветви гиперболы всегда находятся в тех квадрантах, через которые в данный момент проходит плоскость оптических осей.

Для доказательства того, что темные кривые этого разреза действительно являются ветвями гиперболы, обратимся к рис. 87. Здесь A_1 и A_2 — выходы оптических осей с координатами соответственно (a, b) и $(-a, -b)$. Берем произвольную точку M с координатами (x, y) , лежащую на темной кривой

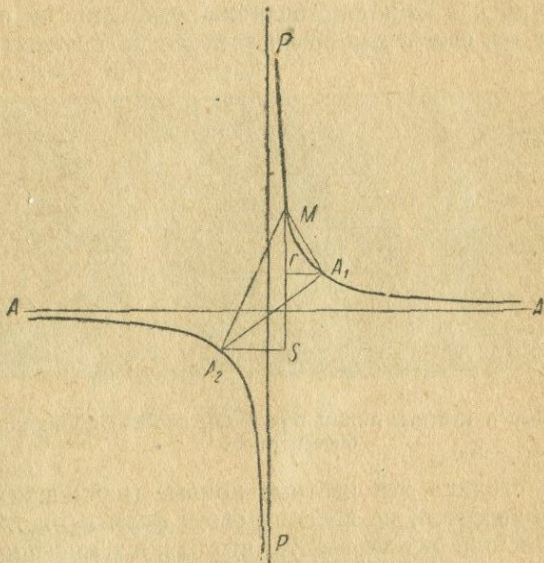


Рис. 87.

в о и (следовательно, направления колебаний в точке M параллельны колебаниям A и P). Наносим главные сечения MA_1 и MA_2 . Через точку M проводим прямую $MS \parallel P$. По теореме Френеля MS есть биссектриса угла A_1MA_2 , т. е. $\angle A_1MS = \angle A_2MS$. Из A_1 и A_2 опускаем на MS перпендикуляры A_1r и A_2S .

$$\triangle A_1rM \sim \triangle A_2SM.$$

Следовательно,

$$\frac{Mr}{rA_1} = \frac{MS}{SA_2}, \text{ или } Mr \cdot SA_2 = MS \cdot rA_1,$$

но

$$Mr = y - b; \quad SA_2 = x + a; \quad MS = y + b; \quad rA_1 = a - x,$$

Подставляя эти выражения в последнее равенство,

имеем:

$$(y - b)(x + a) = (y + b)(a - x),$$

или

$$xy + ay - bx - ab = ay - xy + ab - bx,$$

или

$$xy = ab.$$

что представляет собой уравнение гиперболы, отнесенное к асимптотам, т. е. темные кривые исследуемого разреза являются ветвями гиперболы, асимптотами которой служат направления колебаний николей.

Цветные линии. Если кристалл обладает большим двуупределением или имеет значительную толщину, то, кроме серого и белого цвета I порядка, появляются и более высокие интерференционные цвета. Распределение их следующее: наиболее низкая окраска находится вокруг выходов оптических осей, которые окружены кольцами повышающихся интерференционных цветов. Только ближайšie к оптическим осям кольца имеют форму окружности; по мере удаления от осей они искажаются, вытягиваясь к центру фигуры (к выходу острой биссектрисы). При еще большем удалении от осей цветные линии сливаются в общие для обеих осей овалы с вогнутыми боками.



Рис. 88. Темные и цветные линии в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе.

При вращении столика эти цветные кривые (называемые лемнисками) вращаются, не изменяя своей формы (рис. 88).

На том же рисунке можно видеть, что балки темного креста, получающегося при совмещении осей n_m и Т. Б. с колебаниями николей, в случае кристаллов с большой разностью хода, имеют несколько различную форму. Балка, параллельная Т. Б. (совпадающая с плоскостью оптических осей), несколько уже, чем балка, параллельная оси n_m и имеет перехваты в точках выхода оптических осей.

с. Факторы, влияющие на величину расхождения ветвей гиперболы. Истинный и видимый углы оптических осей. Формула Малляра

При вращении столика микроскопа, как уже говорилось, ветви гиперболы отходят на максимальное расстояние друг от друга при повороте на 45° от положения темного креста. При этом в вершинах гипербол находятся выходы оптических осей. Следовательно, на величину расхождения ветвей гиперболы в первую очередь влияет угол оптических осей. Однако здесь имеет значение не истинный угол оптических осей ($2V$), свойственный кристаллам данного вещества, а видимый или наблюдаемый ($2E$), который отличается от истинного.

Пусть OA и OA_0 (рис. 89) — направления оптических осей в кристалле, составляющие между собой угол $2V$ и делающие с перпендикуляром к поверхности кристалла угол V . Выходы оптических осей в коноскопической фигуре образуются лучами, проходящими через кристалл параллельно этим направлениям. Однако эти лучи, выходя из кристалла, испытывают преломление и идут по направлениям AA_1 и A_0A_2 , делающим с перпендикуляром к поверхности кристалла угол E , а между собой угол $2E$. Легко видеть, что $\frac{\sin E}{\sin V} = n_m$ (так как для луча, идущего по оптической оси, кристалл имеет показатель преломления n_m) или $\sin E = n_m \sin V$.

Отсюда видно, что видимый угол оптических осей значительно больше истинного. Если $n_m = 1,7$, то при объективе № 7 с коноскопическим охватом 116° выходы оптических осей будут на краях поля при $2V = 60^\circ$. При еще большем угле оптических осей ветви гиперболы при вращении столика будут выходить за пределы поля зрения.

Угол $2E$ можно уменьшить, если промежуток между объективом и препаратом заполнить жидкостью с показателем преломления $N > 1$. Тогда приведенная выше формула заменяется более общей:

$$\sin E = \frac{n_m}{N} \sin V.$$

В частном случае, когда $N = n_m$, видимый угол равен истинному. При $N > n_m$ видимый угол меньше истинного.

Как показал Малляр, расхождение ветвей гиперболы можно считать прямо пропорциональным синусу половины видимого угла оптических осей, т. е. $\sin E = KD$, где D — расстояние между вершинами ветвей гиперболы при их максимальном расхождении. Его проще всего измерить при помощи окуляра, снабженного микрометрической линейкой. K — коэффициент, зависящий от оптической системы микроскопа (коноскопический угол объектива и цена деления окуляр-микрометра).

Подставив в формулу Малляра приведенное выше значение для $\sin E$, получаем: $\sin V = KD \frac{N}{n_m}$.

Для частного случая, когда наблюдение ведется в воздухе,

$$N = 1 \text{ и } \sin V = \frac{KD}{n_m}.$$

Константа K легко измеряется при помощи апертометра. При отсутствии этого приспособления можно определить K , измерив D для

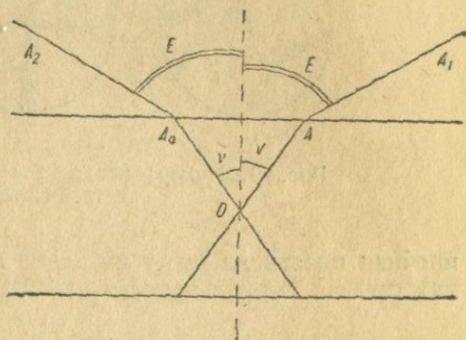


Рис. 89.

какого-либо минерала постоянного состава, угол $2E$ которого известен (например, барит).

Так как для определения $2V$ требуется знать показатель n_m минерала, часто, особенно в старых работах, ограничиваются определением угла $2E$.

d. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе

Знак определяется в этом разрезе аналогично разрезу, перпендикулярному к оптической оси одноосного кристалла, а именно: если

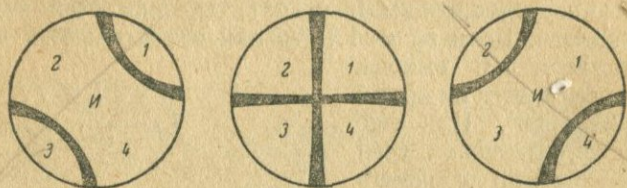


Рис. 90. Номера квадрантов при разных положениях ветвей гиперболы.

пробная пластинка имеет по длине n_p , то в положительных кристаллах прямая параллельность наблюдается в 1-м и 3-м квадрантах,

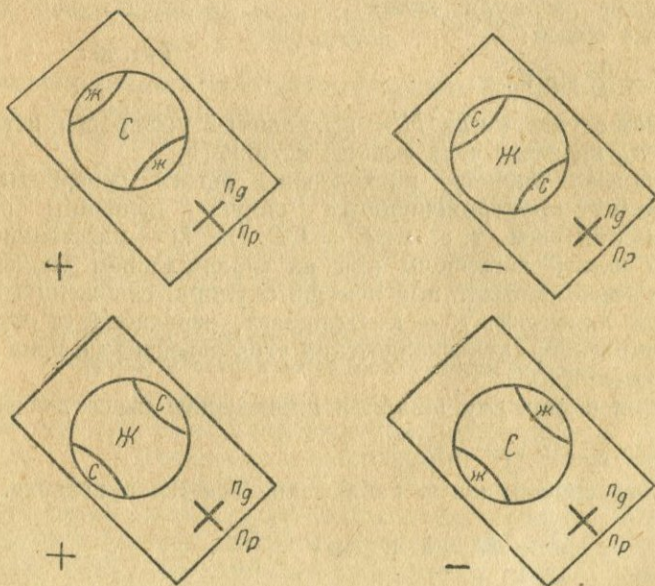


Рис. 91. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе, при помощи гипсовой пластинки.

а обратная — во 2-м и 4-м. В отрицательных — соответственно — наоборот.

Практически не всегда удобно определять знак в этом разрезе в тот момент, когда фигура имеет вид креста, и мы рекомендуем перед вдвиганием гипсовой пластинки поворачивать столик на 45° — до максимального расхождения ветвей гиперболы. При этом правило квадрантов остается в силе. Надо только допустить, что одновременно

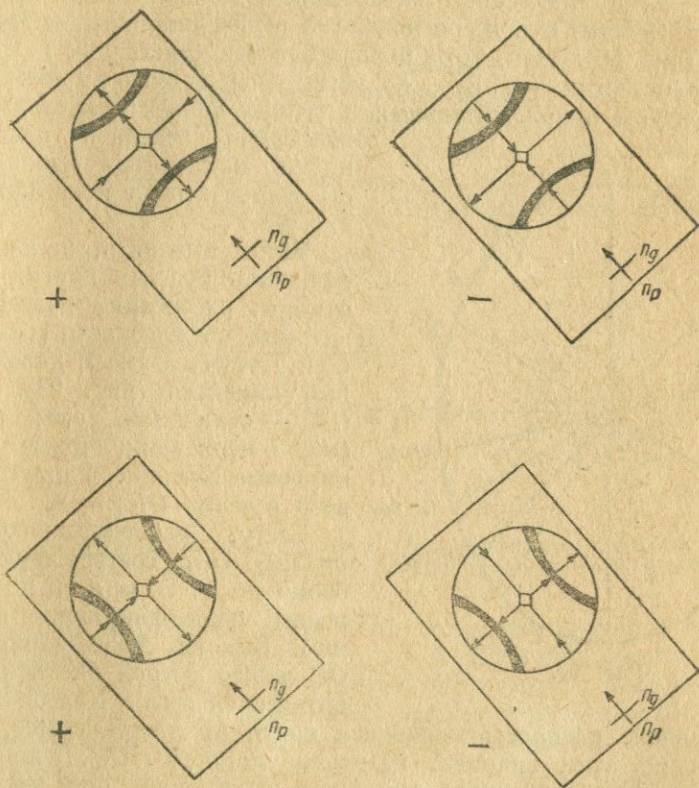


Рис. 92. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе, при помощи кварцевого клина.

с расхождением ветвей гиперболы вместе с ними удаляются от центра и два ограниченных ими квадранта, а два других квадранта сливаются вместе (рис. 90).

На рис. 91 и 92 показано определение знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе. В этом разрезе, поскольку в поле зрения имеются выходы оптических осей, всегда возможно определение знака при помощи гипсовой пластинки. При высокой разности хода, вдвигая пластинку, надо следить за изменением интерференционной

окраски в участках, непосредственно прилегающих к выходам оптических осей, где разность хода всегда мала.

Доказательство правила определения знака. Для центральной точки фигуры справедливость изложенного выше правила доказывается без труда. Эта точка образована волнами, распространяющимися по острой биссектрисе, колебания в ней совершаются по двум другим осям индикатрисы — n_m и Т. Б. Тупая биссектриса лежит в плоскости оптических осей, проходящей через вершины гиперболы. Ось n_m расположена перпендикулярно к этой плоскости (рис. 86). Зная, что в положительных кристаллах Т. Б. = n_p , а в отрицательных — Т. Б. = n_g , убеждаемся в том, что в центральной точке фигуры в положительных и отрицательных кристаллах, при вдвигании гипсовой пластинки, прямая и обратная параллельности соответствуют показанному на рис. 91.

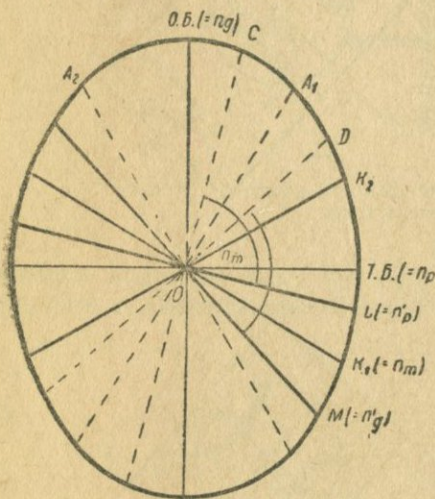


Рис. 93.

Чтобы выяснить, какая параллельность будет в других точках фигуры, рассмотрим разрез индикатрисы по плоскости оптических осей. Пусть мы имеем положительный кристалл (рис. 93). OA_1 и OA_2 — оптические оси; OK_1 и OK_2 — перпендикулярные к ним круговые сечения. Радиус кругового сечения $OK_1 = n_m$.

Свету, распространяющемуся по О. Б. = n_g , соответствуют колебания по Т. Б. = n_p и по n_m (лежащей перпендикулярно к чертежу). Возьмем любое направление OC между острой биссектрисой и оптической осью. Колебания световых волн, распространяющихся по этому направлению, совершаются по осям эллипса, перпендикулярного к OC . Этими осями будут ось n_m и лежащий в плоскости оптических осей вектор OL ; OL находится между n_p и $OK_1 = n_m$, поэтому величина его имеет промежуточное значение: $n_p < OL < n_m$.

Обозначим OL через n'_p . Поскольку $OL < n_m$, параллельность с гипсовой пластинкой в точке C должна быть такая же, как и в центре коноскопической фигуры.

Возьмем теперь направление OD , лежащее за оптической осью (т. е. между оптической осью и Т. Б.). В точке D колебания совершаются по n_m и по направлению OM , лежащему в плоскости оптических осей. OM лежит между n_g и $OK_1 = n_m$; поэтому $n_m < OM < n_g$. Обозначим OM через n'_g . Так как $OM > n_m$, параллельность в точке D обратна той, которая имеет место в центре коноскопической фигуры. Следовательно, во всех точках, лежащих между выходами острой

биссектрисы и оптической оси, при вдвижении гипсовой пластинки (или кварцевого клина) параллельность будет та же, что и в точке выхода острой биссектрисы; в точках же, лежащих за выходом оптической оси (за гиперболой), параллельность будет обратна наблюдаемой в центре.

Для отрицательных кристаллов доказательство совершенно аналогично.

е. Разрез, перпендикулярный к оптической оси двусного кристалла

Фигура этого разреза легко выводится из фигуры предыдущего разреза, если представить его наклоненным так, чтобы одна из оптических осей оказалась перпендикулярной к плоскости столика микроскопа. В тот момент, когда плоскость оптических осей совпадает с направлением колебаний одного из николей, образуется темный крест, имеющий центром выход острой биссектрисы. В поле зрения, если

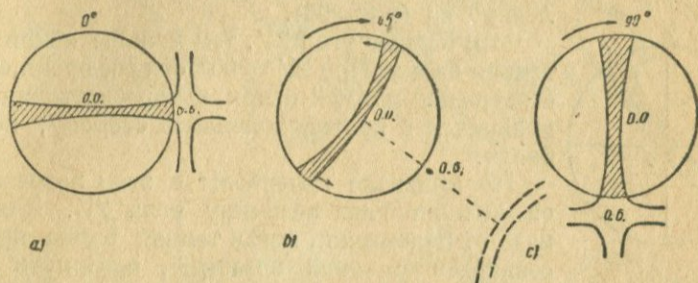


Рис. 94. Коноскопическая фигура разреза, перпендикулярного к оптической оси двусного кристалла (круг — пределы поля зрения).

выход острой биссектрисы лежит за его пределами, видна только одна прямая балка этого креста (рис. 94, а и с). Если же выход О. Б. также находится в поле зрения, что возможно при не очень большом $2E$, то вблизи края поля будет виден центр креста. При вращении столика крест распадается на две ветви гиперболы, из которых в поле зрения видна только одна. Если оптическая ось точно перпендикулярна к столику микроскопа, то ветвь гиперболы будет все время проходить через центр коноскопической фигуры (так как выход оптической оси всегда лежит на гиперболе). Наибольшую кривизну гипербола приобретает при повороте на 45° от положения, когда прямая балка параллельна нити (рис. 94, б).

Таким образом в разрезе, перпендикулярном к оптической оси все время видна одна, проходящая через центр поля, ветвь гиперболы. При вращении столика она то выпрямляется, совпадая при этом с одной из нитей окулярного креста, то искривляется, приобретает наибольшую кривизну при повороте на 45° от положения прямой балки. Из рис. 94 видно, кроме того, что ветвь гиперболы все время вращается в сторону, противоположную вращению столика (оба конца ее — встречные) и выпуклостью своей обращена в сторону острой биссектрисы.

Если разрез не точно перпендикулярен к оптической оси, но выход последней находится в поле зрения, то гипербола не остается все

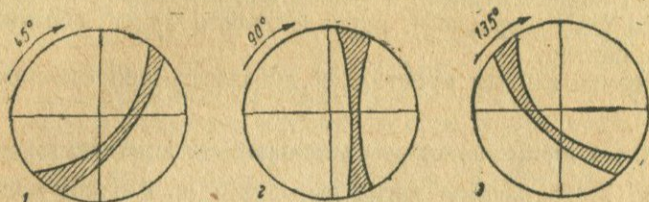


Рис. 95. Фигуры разрезом, не вполне перпендикулярных к оптической оси двусосного кристалла.

время в центре, а перемещается в поле. Превращаясь в прямую балку, она может в этом случае не совпасть с нитью, а располагается параллельно ей (рис. 95).

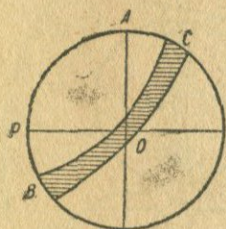


Рис. 96.

Чем больше угол $2V$, тем меньше искривляется темная балка. При $2V = 90^\circ$ она все время остается совершенно прямой и при повороте столика лишь вращается в противоположную сторону, не изгибаясь.

По кривизне гиперболы в этом разрезе легко оценить на глаз величину угла $2V$. Для этого надо от положения, когда темная балка прямая и совпадает с одной из нитей, повернуть столик ровно на 45° . Концы изогирь¹ делят теперь окружность поля зрения на две неравные части: большую, — обращенную к выпуклой стороне гиперболы, и меньшую, — обращенную к вогнутой стороне ее. Угол $2V$ численно приближенно равен меньшей дуге окружности минус 90° . На рис. 96 $2V \approx \angle BOC - 90^\circ$, или, иначе, — угол V численно равен дуге, заключенной между концом изогирь и ближайшим к нему концом нити окулярного креста. На рис. 96 $2V \approx 2 \angle BOP \approx 2 \angle AOC$. Определение по

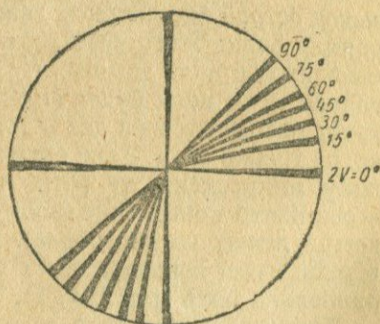


Рис. 97. Диаграмма Райта для приближенного определения угла $2V$ в разрезе, перпендикулярном к оптической оси.

¹ Темные линии коноскопической фигуры (балки, ветви гиперболы и пр.) называются изогирями. Изогиря есть геометрическое место точек фигуры, в которых направления колебания параллельны главным сечениям николей.

f. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

Теория определения знака в этом разрезе та же, что и для разреза, перпендикулярного к острой биссектрисе. Вывод, сделанный в § 4, d рис. 93 может быть использован и здесь. Фигура по сравнению с разрезом, перпендикулярным к О. Б. представляет лишь то отличие, что в поле зрения видна только одна ветвь гиперболы, а вместо четырех квадрантов — три: один — с вогнутой стороны изогирь и два — слившиеся вместе — с выпуклой ее стороны.

На рис. 98 показано определение знака при всех возможных положениях изогирь. На практике нет нужды запоминать все эти диаграммы. Надо, поставив изогирю параллельно нити, повернуть столик

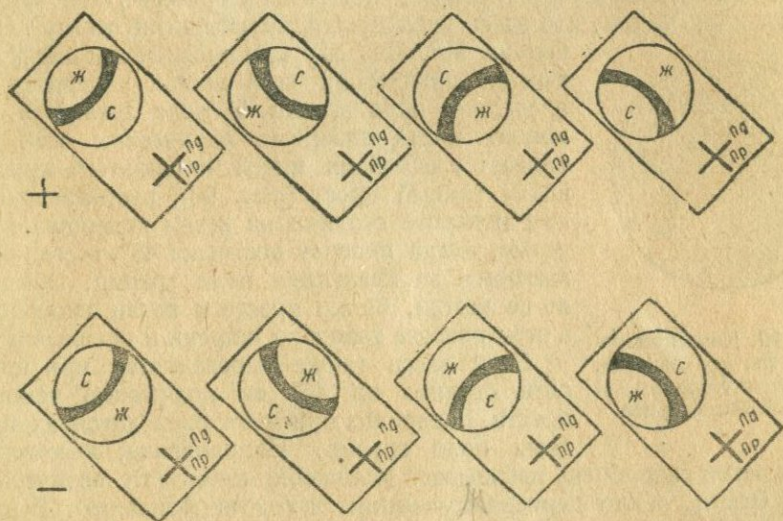


Рис. 98. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси (верхний ряд для положительных, нижний — для отрицательных кристаллов).

на 45° — до наибольшего искривления изогирь, и затем на бумаге или мысленно пририсовать за пределами поля зрения с выпуклой стороны изогирь вторую ветвь гиперболы и пометить, какие квадранты видны в поле зрения. Помня правило квадрантов, выведенное для разреза, перпендикулярного к О. Б., определяем знак при любом диагональном положении гиперболы.

Если угол $2V$ равен или близок к 90° , изогиря при вращении столика все время остается прямой. Поэтому мы не можем наметить положение второй ветви гиперболы, узнать, какие квадранты находятся в поле зрения, а следовательно и определить знак. Это затруднение не является недостатком метода, а вытекает из существа дела. Острая и тупая биссектрисы геометрически различаются лишь тем, что одна делит острый, а другая тупой угол оптических осей. При $2V$, близком

к 90° , острый и тупой углы почти равны, и различие между О. Б. и Т. Б. теряется.

При большом угле $2V$ у кристалла, надо точно совместить изогрифу с нитью, затем повернуть столик точно на 45° и, не вращая столик, наблюдать изогнутость гиперболы. Если при этом не удастся отличить выпуклую сторону от вогнутой, определение знака невозможно. При $2V = 87-88^\circ$ обычно еще удается определить оптический знак кристалла.

г. Разрез, перпендикулярный к тупой биссектрисе. Определение знака в этом разрезе

Отличие этого разреза от разреза, перпендикулярного к О. Б. заключается лишь в том, что здесь угол между оптическими осями — $2V_1$

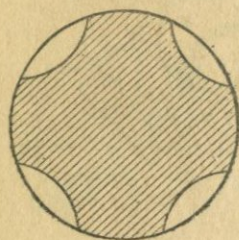


Рис. 99. Коноскопическая фигура разреза, перпендикулярного к тупой биссектрисе.

больше 90° . Поэтому при наблюдении в воздухе выходы оптических осей всегда находятся за пределами поля зрения. В поле зрения в тот момент, когда плоскость оптических осей совпадает с одной из нитей окулярного креста, виден темный крест (рис. 99), распадающийся при повороте столика на ветви гиперболы, которые, когда поворот достигает 45° , всегда оказываются за пределами поля зрения. Обычно, но не всегда, балки креста и ветви гиперболы в этом разрезе довольно широки и расплывчаты.

Знак здесь также определяется при повороте столика на 45° от положения темного креста. Гипербола при этом расходится за пределы поля зрения. Направление, в котором ушли ветви гиперболы, показывает положение плоскости оптических осей. Ось n_m лежит перпендикулярно к этому направлению. В плоскости оптических осей горизонтально расположена острая биссектриса. Отсюда вытекает следующее правило: надо повернуть столик на 45° от положения темного креста, проследив при этом, через какие квадранты поля зрения ушли ветви гиперболы. Линия, соединяющая эти квадранты, является острой биссектрисой. С помощью гипсовой пластинки или кварцевого клина определяем ее наименование. В положительных кристаллах О. Б. = n_g , в отрицательных — О. Б. = n_p (рис. 100).

н. Сопоставление фигур разрезом, перпендикулярных к острой и тупой биссектрисам

В разрезе, перпендикулярном к О. Б. направление, в котором расходятся ветви гиперболы, является тупой биссектрисой, в разрезе, перпендикулярном к Т. Б. — острой. Поэтому правила для определения знака в этих разрезах различны, и, приступая к определению знака,

необходимо знать, какое из этих двух правил применить, т. е. с каким именно разрезом мы имеем дело.

Если ветви гиперболы при вращении столика не уходят за пределы поля, разрез перпендикулярен к острой биссектрисе. Если же ветви гиперболы уходят за пределы поля, одного этого недостаточно, чтобы заключить, что разрез перпендикулярен к тупой биссектрисе (или к n_m). При достаточной большой величине угла $2V$ гиперболы и в раз-

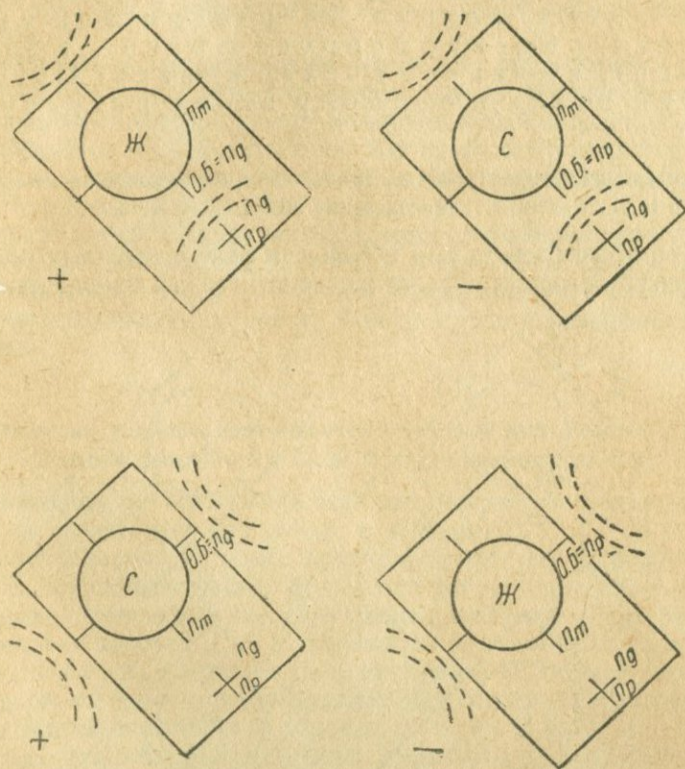


Рис. 100. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к тупой биссектрисе.

резе, перпендикулярном к О. Б. уходят за пределы поля. Если к тому же вещество обладает высоким показателем преломления, ветви гиперболы уходят за пределы поля и при сравнительно небольшом $2V$ (см. гл. VIII, § 4 с). Поэтому, чем выше показатель преломления минерала, тем легче принять разрез, перпендикулярный к О. Б. за разрез, перпендикулярный к Т. Б. В качестве примера можно привести дистен ($n_m = 1,72$; $2V = 82^\circ$), у которого угол просветления в разрезе, перпендикулярном к О. Б. = $17-18^\circ$, т. е. уже при повороте столика на 18° гипербола оказывается за пределами поля зрения.

Чтобы не ошибиться при определении знака, в практической работе надо руководствоваться следующим правилом:

При распадении креста в гиперболу, ветви которой расходятся за пределы поля зрения, только в том случае можно считать, что разрез перпендикулярен не к острой биссектрисе, если ветви гиперболы расплывчатые и быстро уходят за пределы поля. Если же ветви имеют резкие очертания или уходят медленно, решение вопроса о разрезе затруднительно, и следует воздерживаться от определения знака по одному этому разрезу.

i. Разрез, перпендикулярный к оси n_m (параллельный плоскости оптических осей).
Определение знака

Фигура этого разреза при небольшом угле оптических осей напоминает фигуру разреза, параллельного оптической оси одноосных кри-

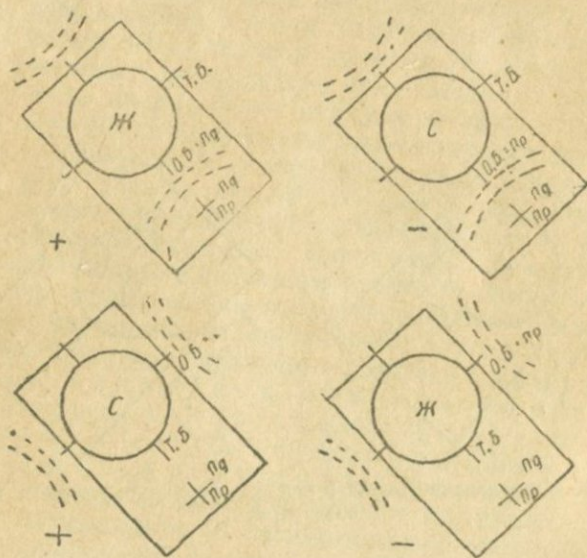


Рис. 101. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к оси n_m .

сталлов и разреза, перпендикулярного к Т. Б. В тот момент, когда О. Б. и Т. Б. параллельны нитям окуляра, виден неясный серый крест, центральная часть которого заполняет все или почти все поле зрения. При повороте столика крест распадается, и видны ветви гиперболы, быстро уходящие за пределы поля зрения.

Угол просветления¹ около 7—12°. Ветви гиперболы (как и в разрезе, перпендикулярном к Т. Б.) уходят в те же квадранты, в которых после поворота оказывается острая биссектриса.

Для определения знака поворачивают столик от положения темного креста на 45°, проследив при этом, через какие квадранты поля зрения ушли ветви гиперболы. Линия, проходящая через эти квадранты, как мы уже сказали, является острой биссектрисой. Определение знака, как и в разрезе, перпендикулярном к Т. Б. сводится к определению наименования острой биссектрисы (рис. 101).

Теория показывает, что, кроме гиперболы, расходящейся в сторону острой биссектрисы, при распадении креста образуется еще одна гипербола, ветви которой уходят в сторону тупой биссектрисы. Однако при небольших и средних углах $2V$ ветви этой второй гиперболы уходят за пределы поля настолько быстро, что остаются незамеченными. При больших углах $2V$ скорость ухода ветвей гиперболы, идущих в сторону тупой биссектрисы, замедляется и становится сравнимой со скоростью расхождения в сторону острой биссектрисы. При этом гиперболы сливаются, и получается впечатление, что темнота уходит во все четыре квадранта сразу. В этом случае определение знака невозможно.

Ж. Сопоставление разрезов, параллельного оптической оси одноосного кристалла, перпендикулярного к Т. Б. и перпендикулярного к n_m

При малом угле оптических осей индикатриса по форме мало отличается от эллипсоида вращения, а сечение n_m Т. Б. (\perp О. Б.) — от кругового сечения. В таких кристаллах фигуры в разрезах $\perp n_m$ и \perp Т. Б. неотличимы одна от другой и от фигуры одноосного кристалла параллельно оптической оси. При средней величине $2V$ разрез \perp Т. Б. отличается от разреза $\perp n_m$ несколько более медленным расхождением ветвей гиперболы, но разрез $\perp n_m$ неотличим от разреза параллельно оптической оси одноосного кристалла. При большом $2V$ разрез \perp Т. Б., как мы видели, неотличим от разреза \perp О. Б. В разрезе $\perp n_m$ в этом случае фигура получается весьма расплывчатая и неясная, серый крест едва заметен, и, при распадении его, нельзя заметить, в какие квадранты он расходится, и, следовательно, нельзя определить знак. Такая фигура в разрезе $\perp n_m$ получается уже при углах $2V$, близких к 70°.

Таким образом, если сечение кристалла дает фигуру, имеющую вид широкого креста, ветви которого при повороте быстро уходят за пределы поля, в большинстве случаев приходится воздерживаться от суждения об осности минерала, так как такая фигура бывает и у одно-

¹ Углом просветления мы называем минимальный угол, на который надо повернуть столик микроскопа от положения темного креста, чтобы ветви гиперболы вышли за пределы поля зрения.

осных и у двусосных кристаллов.¹ Знак кристалла тем не менее определить можно. Из рис. 82, 100 и 101 видно, что правило определения знака во всех этих трех сходных разрезах одно и то же. Следовательно, для определения знака не обязательно знать, с каким именно из этих трех разрезов мы имеем дело.

к. Косой разрез двусосного кристалла

Если разрез несколько наклонен к оптической оси или к одной из главных осей индикатрисы, но все же данная ось имеет выход в поле зрения коноскопа, получается одна из уже рассмотренных фигур, но несколько смещенная. Такие фигуры нет нужды рассматривать особо. В этом параграфе будем говорить о том случае, когда ни одна из оптических или из главных осей индикатрисы не находится в пределах поля зрения коноскопа.

Фигура косого разреза характеризуется тем, что при вращении столика микроскопа через поле зрения по очереди проходят темные искривленные или прямые балки. Одновременно в поле видна только одна балка. Балки эти могут передвигаться под углом к нитям или параллельно, сохраняя свою кривизну или менять ее, изгибаясь и выпрямляясь. В общем случае, когда разрез проходит косо не только к главным и оптическим осям, но и к плоскостям симметрии индикатрисы, изогирь, прямые или искривленные, проходят поочередно через поле под углом к нитям. На двусосность кристалла с несомненностью указывает следующий признак: в момент прохождения середины поля зрения изогиря не параллельна нити окулярного креста. Иногда можно заметить, что изогиря, делящая при прохождении через центр поля косой угол с нитью, удаляясь от центра, выпрямляется и становится параллельно нити. Это также может быть только в двусосных кристаллах (рис. 102, *a* и *b*).

Иная картина получается, если плоскость разреза не перпендикулярна ни к одной из осей индикатрисы, в то же время перпендикулярна к какой-либо из ее плоскостей симметрии (т. е. к плоскости $n_g n_p$, $n_g n_m$ или $n_m n_p$). Получающаяся коноскопическая фигура в этом случае также должна обладать соответствующей симметрией; поэтому изогиря, проходя через середину поля, оказывается прямой и параллельной нити, и фигура напоминает фигуру косого разреза одноосных кристаллов. При повороте столика, как и в одноосных кристаллах, изогиря, уходя за пределы поля зрения, либо остается прямой и параллельной самой себе, либо изгибается, причем вогнутая сторона обращена к ближайшему краю поля зрения (рис. 102, *c*).

¹ Если угол просветления заметно превышает 15° (при объективе № 7), кристалл наверняка двусосный и разрез перпендикулярен к тупой биссектрисе (при большом показателе преломления и большом $2V$ может быть также разрез $\perp O. B.$). Углы просветления меньше $12-15^\circ$ могут быть в любом из трех рассматриваемых разрезов.

Если разрез проходит перпендикулярно к плоскости О. Б. Т. Б., фигура обычно неотличима от фигуры косога разреза одноосных кристаллов. Если угол $2V$ малый или средний, такая же фигура получается в разрезах, перпендикулярных к плоскости О. Б. n_m . При этом, чем дальше за пределами поля зрения расположена оптическая ось, тем быстрее проходят изогирь через поле зрения, тем шире они и тем менее ясно видны (ср. рис. 76 и 79).

Иная картина получается в разрезах перпендикулярных к плоскости n_m Т. Б. Эти разрезы всегда сильно наклонены к оптической оси,

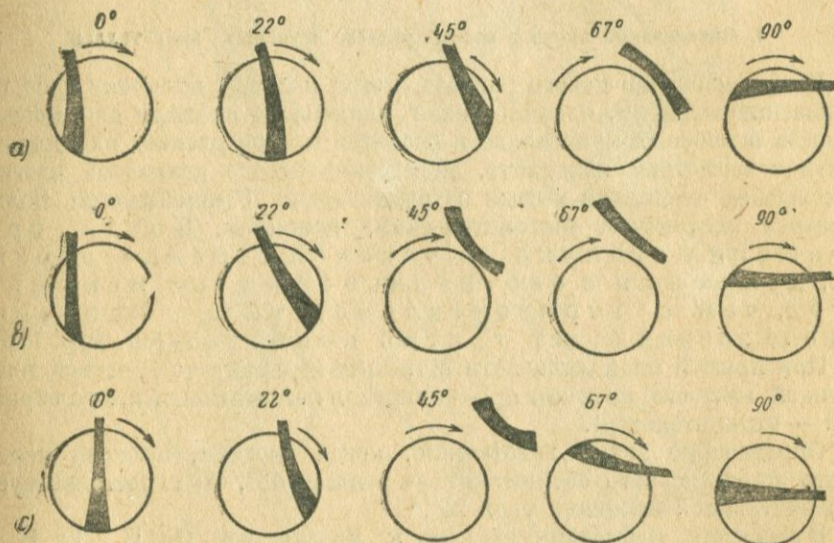


Рис. 102. Коноскопические фигуры косых разрезов двусных кристаллов.

поэтому изогирь всегда широкая и проходит быстро через поле зрения. Но при этом самый характер ее движения иной. В описанных выше

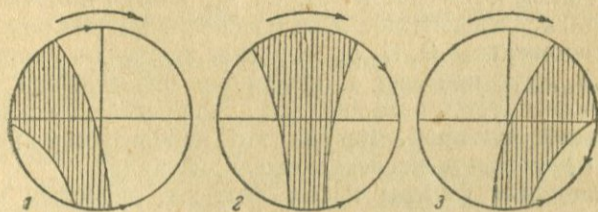


Рис. 103. 1, 2, 3 — моменты движения «веерообразной» изогирь, сопутствующий конец которой шире и движется быстрее, чем встречный. Стрелки над рисунками указывают направление движения столика микроскопа.

разрезах, перпендикулярных к плоскостям О. Б. Т. Б. и О. Б. n_m , так же как в одноосных, сопутствующий вращению конец изогирь

тоньше и движется медленнее, чем встречный. Такую изогирю Бекке называет маятниковой. В разрезе же, перпендикулярном к плоскости Т. Б. n_m сопутствующий конец изогрири шире и движется быстрее, чем встречный (рис. 103). Такую изогирю Бекке называет веерообразной. Веерообразная изогиря может быть только в двусосных кристаллах. При больших $2V$, начиная с $60-70^\circ$, в достаточно удаленных от оптической оси разрезах, перпендикулярных к плоскости О. Б. n_m изогиря также может быть веерообразной.

1. Определение знака в косом разрезе двусосных кристаллов

В общем случае косого разреза, когда изогиря проходит косо по отношению к нитям, правило знака аналогично правилу для косого разреза одноосных кристаллов и сводится к определению параллельности в известном квадранте. Вследствие косого движения изогиря нахождение квадранта иногда затруднительно. Рекомендуется пользоваться следующим «автоматическим» правилом. Когда при вращении столика по часовой стрелке изогиря, делающая с вертикальной нитью меньший угол, чем с горизонтальной, уйдет направо, в поле зрения будет третий квадрант (ср. стр. 110).

При прямой параллельности в третьем квадранте (с гипсовой пластинкой, имеющей по длине n_p) — кристалл положительный, при обратной — отрицательный.

Определение знака невозможно, когда изогиря, проходя через центр поля, делает с обеими нитями углы по 45° , что свидетельствует о значительной величине угла $2V$.¹

В разрезах, перпендикулярных к плоскостям О. Б. Т. Б. и О. Б. n_m знак определяется так же, как в косом разрезе одноосных кристаллов.

В разрезе, перпендикулярном к плоскости Т. Б. n_m правило для определения знака обратное (рис. 104), но мы уже видели, что в разрезе, перпендикулярном к плоскости О. Б. n_m иногда получается аналогичная фигура, и, следовательно, есть опасность принять разрез, перпендикулярный к плоскости О. Б. n_m за разрез, перпендикулярный к плоскости Т. Б. n_m , что приведет к неверному определению знака. Поэтому не рекомендуется пользоваться для определения знака фигурой с веерообразной изогирей. Фигура эта используется лишь как доказательство двусосности исследуемого кристалла.

Коноскопические фигуры косых разрезов двусосных кристаллов до сих пор теоретически недостаточно изучены. Изложенные выше правила для определения знака в косых разрезах носят до известной степени условный характер и иногда, главным образом при больших углах $2V$, дают неверные результаты. С особенной осторожностью

¹ Малый угол между нитью и изогирей не свидетельствует о малом угле оптических осей, так как мы уже видели, что угол между изогирей и нитью может быть даже равен нулю независимо от величины $2V$.

надо относиться к определению знака в сильно косых разрезах, в которых изогриы широки, расплывчаты и быстро проходят через поле зрения и в разрезах, имеющих выход оптической оси непосредственно за краем поля зрения.

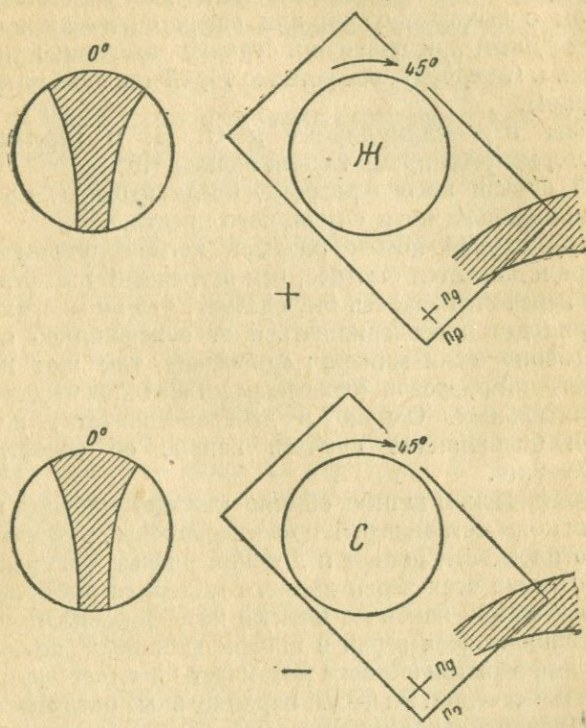


Рис. 104. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к плоскости Т. Б. nm (с веерообразной изогрией).

§ 5. Определение осности по коноскопическим фигурам

Для оценки надежности определения осности кристаллов по коноскопическим фигурам рассмотрим все изученные нами фигуры, соответственно их сгруппировав.

1. Фигуры, свойственные исключительно одноосным кристаллам. С несомненностью указывает на одноосность кристалла коноскопическая фигура только в одном случае, а именно — когда в поле зрения имеется выход оптической оси (нерасходящийся темный крест).

2. Фигуры неопределенной осности (возможные и в одноосных и в двуосных кристаллах).

а) Сюда относятся фигуры косых разрезов одноосных кристаллов, так как такие же фигуры возможны в двуосных кристаллах, когда разрез, являясь косым относительно осей, перпендикулярен к плоскости симметрии индикатрисы.

б) Фигура разреза, параллельного оптической оси одноосного кристалла (серый, быстро расходящийся крест с углом просветления меньше 15°) похожа на фигуры разрезов, перпендикулярных n_m и часто перпендикулярных Т. Б. двuosных кристаллов.

3. Фигуры, свойственные исключительно двuosным кристаллам.

а) Фигуры с выходом одной или обеих оптических осей в поле зрения (неуходящая при вращении столика изогиря, или крест, превращающийся в гиперболу, обе ветви кторой или одна из них остаются в поле зрения).

б) Фигуры перпендикулярные к О. Б. и перпендикулярные к Т. Б., в которых угол просветления больше 15° .

с) Общий случай косоого разреза, когда изогиря, проходя через центр, не параллельна нити окулярного креста.

д) Частный случай косоого разреза, когда сопутствующий конец изогиря шире и движется быстрее, чем встречный (см. стр. 133—134).

Из этого перечня, казалось бы, следует, что во многих случаях на практике приходится воздерживаться от суждения об осности кристаллов, особенно если минерал одноосный, так как из трех возможных категорий разрезов одноосных кристаллов — два попадают в разряд сомнительных. Однако в действительности, наоборот, — в значительном большинстве случаев вопрос об осности решается вполне однозначно.

В петрографическом шлифе обычно каждый минерал представлен значительным количеством зерен, ориентированных различным образом относительно плоскости шлифа и дающих разные фигуры. Для определения осности из всех зерен данного минерала выбирают в шлифе такие, которые имеют наиболее низкую интерференционную окраску. Поскольку толщина всех зерен в шлифе одинакова, низкая по сравнению с другими зернами окраска указывает на малое двупреломление избранного нами сечения. Разрезы, параллельные оптической оси одноосного кристалла, перпендикулярные к n_m и к Т. Б. двuosного, и сильно косые разрезы, обладающие большим двупреломлением, будут таким образом исключены. В большинстве случаев мы будем иметь либо разрез с выходом оптической оси в поле зрения, в котором осность определяется однозначно, либо разрез немного косоой, в котором одноосный кристалл обнаруживает прямые изогиря, двигающиеся параллельно нитям. В двuosном кристалле лишь изредка, случайно, разрез может оказаться перпендикулярным к плоскости симметрии индикатрисы и дать подобную же фигуру. Но в этом случае любое другое зерно, иначе ориентированное, укажет исследователю, что он имеет дело с двuosным минералом. Таким образом, если ряд зерен в шлифе дает фигуру, характерную для косоого разреза одноосных кристаллов, минерал следует считать одноосным. Недоразумение возможно лишь в случае, если исследуемый минерал двuosен, но имеет малый угол оптических осей. В этом случае часто и в косых разрезах общего положения изогиря перемещаются почти параллельно нитям, и для точного суждения об осности желательно найти разрез с выходом оптической оси в поле зрения.

Следовательно, в шлифах затруднения при определении осности могут возникнуть лишь для аксессуарных минералов, присутствующих в шлифе в незначительном количестве, так как среди них может не найтись зерна с подходящим разрезом.¹

В иммерсионных препаратах, как правило, мы не имеем того разнообразия сечений, которое обычно в шлифах, и здесь подход к определенной осности иной.²

§ 6. Ключ для определения коноскопических фигур

I. При вращении столика все время или временами виден темный крест (или серое пятно, занимающее все поле и распадающееся при повороте столика).

A. Крест не распадается при вращении столика. — Кристалл одноосный. Оптическая ось в поле зрения.

1. Крест остается неподвижным при вращении столика — разрез \perp опт. оси одноосного кристалла.

2. Крест слегка смещается, оставаясь параллельным самому себе — разрез почти \perp опт. оси одноосного кристалла.

B. Крест при вращении столика распадается в гиперболу.

1. По крайней мере одна из ветвей гиперболы все время остается в поле зрения — кристалл двuosный; O. Б. в поле зрения.

a. Обе ветви гиперболы при вращении столика остаются в поле зрения — разрез \perp или почти \perp O. Б.

α. Центр креста совпадает с центром поля зрения — разрез \perp O. Б.

β. Центр креста не совпадает с центром поля, но находится на одной из нитей окулярного креста — разрез не точно \perp O. Б., но \perp плоскости O. Б. Т. Б. или O. Б. n_m .

γ. Центр креста не находится на нити — разрез не точно \perp O. Б. и плоскости симметрии индикатрисы.

b. Одна из ветвей гиперболы при вращении столика уходит за пределы поля: O. Б. и одна из оптических осей в поле зрения (см. выше β и γ).

2. Обе ветви гиперболы уходят за пределы поля.

a. Угол просветления $> 35^\circ$ ³ — разрез \perp O. Б. ($2V$ большой) или \perp Т. Б. ($2V$ большой).

b. Угол просветления = $30-15^\circ$ ³ — разрез \perp Т. Б. или \perp O. Б. ($2V$ большой, n_m высокий).

c. Угол просветления $< 13^\circ$ ³.

α. Темнота при повороте столика расходуется равномерно

¹ Изредка в сланцеватых породах, где все зерна одного минерала имеют приблизительно одну и ту же ориентировку, могут возникнуть затруднения и с обычными минералами.

² Об этом смотрите в разделе, посвященном иммерсионному методу.

³ Следует с осторожностью относиться к указываемым в таблице углам просветления. Они установлены эмпирически для объективов с угловой апертурой $110-120^\circ$ (ОМЗ 60 ×, Э. Лейтц, № 6, № 7) и несколько расходятся с данными Ф. Бекке.

во все четыре квадранта — двуосный $\perp n_m$, $2V$ большой.

- β. Темнота (ветви гиперболы) при повороте столика расходуется в два диагонально расположенные квадранта — одноосный \parallel опт. оси или двуосный $\perp n_m$ ($2V$ малый или средний), или двуосный \perp Т. Б. ($2V$ малый).

Ш. Крест не появляется при вращении столика. Одновременно видна только одна темная балка (изогира).

А. Изогира все время остается в поле зрения — кристалл двуосный. Опт. ось в поле зрения.

1. Изогира при вращении столика все время проходит через центр поля — разрез \perp опт. оси двуосного кристалла.

2. Изогира при вращении столика временами не проходит через центр поля — разрез не точно \perp опт. оси.

а. Изогира, выпрямляясь, совпадает с нитью — разрез не точно \perp опт. оси, но \perp плоскости опт. осей.

б. Изогира, выпрямляясь, становится параллельно нити, но не совпадает с ней — разрез не точно \perp опт. оси и плоскости опт. осей.

Примечание. Если при вращении столика изогира все время остается прямой, $2V$ близко к 90° . Определение знака невозможно.

В. Изогира при вращении столика не все время остается в поле зрения — косые разрезы.

1. Находясь в середине поля зрения, изогира делает косые углы с нитями окулярного креста — кристалл двуосный. Разрез проходит косо ко всем осям, а также к плоскостям симметрии индикатрисы.

2. Находясь в середине поля, изогира совпадает с нитью.

а. Сопутствующий конец шире и движется быстрее встречного (веерообразное движение). Кристалл двуосный. Разрез перпендикулярный к плоскости n_m Т. Б. (при больших $2V$, также может быть \perp плоскости n_m О. Б.).

б. Сопутствующий конец тоньше и движется медленнее встречного (маятниковобразное движение) или оба конца движутся с равной скоростью (балка все время прямая) — косой разрез одноосного кристалла или разрез двуосного, проходящий перпендикулярно к плоскости симметрии индикатрисы.

Глава IX

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ

§ 1. Общие положения

Главной силой двупреломления называется разность $n_g - n_p$, т. е. разность между наибольшим и наименьшим показателями преломления кристаллов данного вещества.

Из формулы $\Delta = (n_g - n_p) d$ (гл. VI, § 2) вытекает, что сила двупреломления связана простой зависимостью с разностью хода Δ , приобретаемой лучами в кристалле, и с толщиной кристалла d ; $n_g - n_p = \frac{\Delta}{d}$.

Следовательно, измерив Δ и d , мы можем вычислить разность $n_g - n_p$, не зная в отдельности самих величин n_g и n_p . Сила двупреломления является весьма важной характеристикой при определении минералов в петрографических шлифах, так как до сих пор не разработаны методы непосредственного более или менее точного измерения в шлифах показателей преломления. В иммерсионном методе, позволяющем измерять сами показатели n_g и n_p , эта константа ($n_g - n_p$) имеет лишь второстепенное значение.

От главной силы двупреломления ($n_g - n_p$) (в дальнейшем будем называть ее просто силой двупреломления) необходимо отличать $n'_g - n'_p$ — силу двупреломления случайного разреза кристалла. Показатели n'_g и n'_p в разных разрезах имеют разную величину, причем в общем случае $n'_g < n_g$, а $n'_p > n_p$. Поэтому и $n'_g - n'_p$ меняется в зависимости от разреза и всегда меньше, чем $n_g - n_p$. Главные показатели преломления n_p и n_g мы имеем в одноосных кристаллах, в разрезе параллельном оптической оси, а в двуосных — в разрезе перпендикулярном к оси n_m (гл. IV, § 4). В шлифе, где все зерна имеют одинаковую толщину, эти разрезы характеризуются наиболее высокой интерференционной окраской по сравнению с другими зернами того же минерала (из формулы $\Delta = d (n_g - n_p)$ видно, что при постоянной толщине большей величине $n_g - n_p$ соответствует большая разность хода). При точном определении силы двупреломления недостаточно выбрать в шлифе из зерен данного минерала зерно с наиболее высокой интерференционной окраской. Необходимо еще проверить, действительно ли мы имеем в этом зерне нужный разрез индикатрисы. Проверка достигается рассмотрением коноскопической фигуры.

Итак, чтобы определить силу двупреломления, надо:

1. Отыскать в шлифе среди зерен исследуемого минерала зерно с наивысшей интерференционной окраской.
2. Проверить методом коноскопии разрез выбранного зерна.
3. Измерить толщину зерна.
4. Измерить разность хода.
5. Вычислить силу двупреломления.

Производя деление $\frac{\Delta}{d}$, следует помнить, что обе эти величины должны быть выражены в одних и тех же единицах длины. Надо либо толщину, выраженную в миллиметрах, умножением на 1 000 000 перевести в миллимикроны, либо делением на ту же величину перевести разность хода в миллиметры. Величина $n_g - n_p$ как разность двух отвлеченных чисел есть также число отвлеченное (безразмерное).

§ 2. Измерение толщины зерен в шлифе

Толщина правильно изготовленного петрографического шлифа обычно лежит в пределах 0,02—0,03 мм, чаще всего она равна 0,025—

0,027 мм. Точные методы измерения толщины зерен в шлифе до сих пор не разработаны.¹ Обычно применяется так называемый метод пылинки, представляющий собой видоизменение предложенного де-Шоном в 1767 г. метода определения показателей преломления. Для этого метода необходимо, чтобы микрометрический винт тубуса микроскопа имел шкалу с известной ценой делений (чаще всего 0,002 мм). Объектив берется по возможности сильный (№ 7 и выше; лучше всего — иммерсионный), обладающий малой глубиной фокуса. Движением микрометрического винта микроскоп фокусируется сначала на верхнюю, а потом на нижнюю поверхность зерна (или наоборот). Поверхности эти узнаются по пылинкам, приставшим к ним в процессе изготовления шлифа.

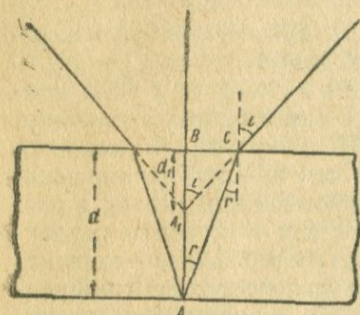


Рис. 105.

Разность отсчетов по шкале микрометрического винта, умноженная на цену одного деления, дает так называемую кажущуюся толщину шлифа d_1 . Истинная толщина d равна кажущейся, умноженной на показатель преломления данного зерна n , т. е. $d = d_1 n$.

Доказательство. Каждую точку объекта можно рассматривать как центр расходящегося пучка лучей. Лучи, идущие от пылинки A , находящейся на нижней поверхности шлифа, выходя в воздух, преломляются. Пылинка будет казаться находящейся не в A , а в A_1 — точке пересечения преломленных

лучей (рис. 105).² Обозначим через r угол между лучом и перпендикуляром к поверхности в зерне и через i — соответствующий угол в воздухе. Из чертежа

видно, что $BC = d \operatorname{tg} r = d_1 \operatorname{tg} i$, откуда $d = d_1 \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}$.

Теория показывает, что в пределах точности метода отношение тангенсов может быть заменено здесь отношением синусов:

$$d = d_1 \frac{\sin i}{\sin r}, \text{ или } d = d_1 n.$$

Показатель преломления зерна достаточно знать лишь приблизительно, с точностью до единицы первого десятичного знака. Если показатель преломления исследуемого минерала не известен даже приблизительно, можно определить толщину в каком-либо из лежащих поблизости зерен знакомых минералов или найти минерал с показателем преломления, лежащим в интервале 1,5—1,6. Такие минералы, как будет показано в гл. XI, § 1, легко узнаются в шлифе по внешнему виду.

Относительная ошибка результата может быть уменьшена путем увеличения d_1 . Для этого воздух между шлифом и объективом заменяют какой-либо жидкостью (иммерсионной средой). Капельку жидкости наносят на шлиф над исследуемым

¹ Давший в высшей степени точные результаты метод Аншелеса применим лишь к иммерсионным препаратам. (См. Зап. Минер. общ., ч. 65, вып. 1, 1925, стр. 153—158.)

² Преломление лучей в слое канадского бальзама над зерном и в покровном стекле одинаково влияет на кажущееся положение как нижних, так и верхних пылинок, поэтому оно не принимается во внимание.

зерном и погружают в нее фронтальную линзу объектива. Выведенная выше формула в этом случае принимает вид:

$$d = d_1 \frac{n}{n_i},$$

где n_i — показатель преломления иммерсионной среды. Если $n_i = n$, то $d_1 = d$, если же $n_i > n$, то $d_1 > d$.

Для повышения точности результата измерения производят 10—20 раз и берут среднее. Для устранения вредного влияния мертвого хода микрометрического винта измерение ведется следующим образом: сначала поднимают тубус микроскопа несколько выше, чем нужно для того, чтобы видеть пылинки верхней поверхности зерна; затем, опуская тубус, берут первый отчет при появлении верхних пылинок и второй — при появлении нижних. Можно, наоборот, опустив тубус ниже, чем нужно, брать отсчеты при его поднятии.

На практике, при измерении толщины петрографического шлифа, все изложенные приемы не могут обеспечить точность выше, чем 5—10% измеряемой величины. Нерассматриваемые здесь методы определения толщины шлифа на федоровском столике дают лишь немногим большую точность. Поэтому всегда, когда это возможно, толщину определяют косвенным методом по минералу, сила двупреломления которого известна. Найдя зерно такого минерала с разрезом, дающим главную силу двупреломления, измеряют в нем разность хода и вычисляют толщину по формуле: $d = \frac{\Delta}{n_g - n_p}$. Определение это

следует производить в той же части шлифа, где находится исследуемый минерал, так как толщина в разных местах шлифа может быть несколько различной. В частности, края шлифа часто тоньше, чем середина.

Определение толщины может производиться по любому известному минералу с постоянными оптическими свойствами. Чаще всего для этой цели используют кварц ($n_g - n_p = 0,009$). По кварцу же можно составить предварительное суждение о толщине шлифа; так, при нормальной толщине (до 0,03 мм) в шлифе отсутствуют зерна кварца с окраской выше белой со слегка желтоватым оттенком. Если же попадают зерна кварца с отчетливо-желтой окраской, толщина шлифа выше нормальной.

§ 3. Определение разности хода при помощи кварцевого клина

Измерение разности хода в целях определения минерала в большинстве случаев не требует специальных точных приборов. Достаточно при помощи кварцевого клина установить, к какому порядку относится интерференционная окраска кристалла и затем по шкале интерференционных цветов найти, какая разность хода соответствует данной окраске данного порядка.

Чтобы установить порядок цвета, надо компенсировать окраску кристалла кварцевым клином и медленно выдвигать клин обратно, следя при этом за сменой цветов на кристалле. На кристалле последовательно пройдут все цвета интерференционной шкалы, начиная от

темносерого (компенсация) до цвета, который имеет кристалл в отсутствии клина. Границы порядков легко устанавливаются по переходу от красного цвета к синему. Количество таких переходов укажет число порядков, предшествующих тому, к которому относится исследуемая окраска кристалла. Если кристалл мал или имеет густую собственную (не интерференционную) окраску, удобнее следить за сменой цветов на незанятом кристаллами месте поля зрения. В момент компенсации на этом месте будет окраска, соответствующая первоначальной интерференционной окраске кристалла. При выдвигании клина цвета будут понижаться. Границы порядков устанавливаются по переходу от синего к красному.

Беря разность хода по шкале, следует учитывать не только цвет, но и оттенок окраски. Например, если кристалл окрашен в зеленый

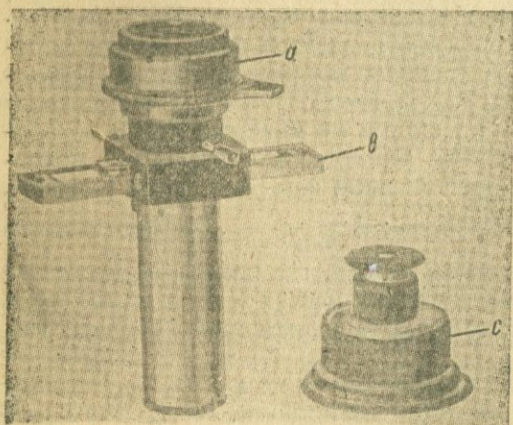


Рис. 106. *a* — окуляр Райта; *b* — градуированный клин, вставленный в прорез окуляра; *c* — накладной анализатор.

цвет II порядка, — интервал от 705 до 828 м μ , надо при чисто зеленой окраске брать середину этого интервала, при синевато-зеленой окраске — брать разность хода ближе к 705 м μ , и при желтовато-зеленой — ближе к 828 м μ . Изложенный метод позволяет определять разность хода с точностью до ± 20 — ± 40 м μ .

Более точные результаты (до ± 10 м μ) получаются при помощи градуированного кварцевого клина. Цена деления клина измеряется при помощи компенсатора Берка или Бабине. При отсутствии компенсаторов можно определить цену деления, заметив сколько делений лежит между фиолетовым I (551 м μ) и фиолетовым II (1105 м μ) и разделив установочную разность 554 м μ на число делений.

Зная цену деления клина и наблюдая, на каком делении произошла компенсация, определяют разность хода. Чтобы увидеть деления на вставленном в прорез тубуса клине, надо вдвинуть линзу Бертрана.

Райт (F. E. Wright) сконструировал специальный окуляр с прорезом в фокальной плоскости, куда вставляется кварцевый клин. Деления на клине Райта непосредственно дают разность хода в миллимикронах. Чтобы наблюдать цвета интерференции клина, вставленного в окуляр Райта, над окуляром помещают специальный, накладной анализатор (рис. 106); обычный анализатор при этом, конечно, должен быть выключен.

§ 4. Компенсатор Бабине

Устаревший компенсатор Бабине еще довольно часто встречается в петрографических лабораториях. Поэтому даем описание работы с ним. Другие конструктивно близкие к нему приборы нами не рассматриваются.

Главной частью компенсатора Бабине являются заключенные в металлическую коробку (рис. 107) один над другим два кварцевых клина, обращенных тонкими концами в противоположные стороны. У одного из клиньев по длине расположена ось n_g , у другого — n_p (рис. 108). Вращением микрометричного винта один из клиньев может передвигаться параллельно своей длине. Компенсатор вставляется на место окуляра, причем коробка располагается под 45° относительно николей. Сверху помещается накладной анализатор в положении, скрещенном относительно поляризатора.¹

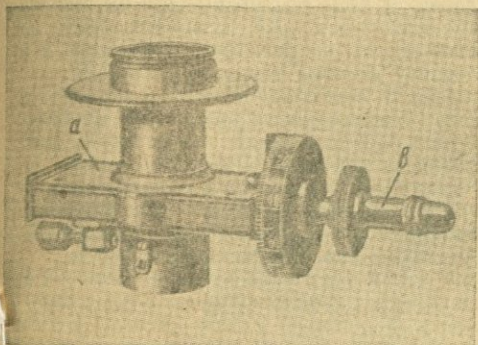


Рис. 107. Внешний вид компенсатора Бабине: *a* — коробка с клиньями; *b* — головка микрометричного винта.

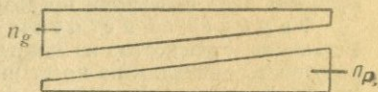


Рис. 108. Взаимное расположение клиньев в коробке компенсатора Бабине.

В середине поля, где толщина обоих клиньев одинакова, будет видна темная полоса компенсации. В обе стороны от нее окраска симметрично повышается. Если теперь на столик микроскопа поместить кристалл в диагональном положении относительно николей, темная полоса сместится, так как разность хода кристалла прибавится к разности хода одного из клиньев. Вращением микрометричного винта темная полоса снова приводится в центр. Винт снабжен отсчетным барабаном, позволяющим учитывать это передвижение. Отсчет по барабану, умноженный на цену деления, дает разность хода с точностью при благоприятных условиях до 2—4 м μ .

Последовательность операций при работе с компенсатором Бабине: 1) В отсутствии препарата ставим компенсатор на место окуляра (коробку — под 45° к николям). Сверху ставим накладной анализатор (из тубуса анализатор удалить!) и вращаем его до скрещенного положения с поляризатором, которое узнается по появлению темной полосы, в обе стороны от которой окраска симметрично повышается (при параллельных николях в середине белая полоса, по бокам которой — две почти черных). 2) Вращением микрометричного винта приводим черную полосу точно на крест нитей.

¹ Из тубуса анализатор необходимо выдвинуть.

Записываем отсчет, соответствующий этому положению (нулевой отсчет). 3) Осторожно снимаем компенсатор вместе с накладным анализатором (не сместить при этом накладной анализатор относительно компенсатора!) и вставляем на место окуляр. 4) Кладем на столик шлиф, помещаем в центр поля зрения исследуемое зерно, при скрещенных николях ставим на погасание и, пользуясь лимбом столика, поворачиваем точно на 45° . 5) Снова удаляем окуляр и осторожно ставим в прежнее положение компенсатор вместе с накладным анализатором (не забыть снова удалить анализатор из тубуса!). 6) Вращением микрометричного винта снова приводим сместившуюся черную полосу в центр. Снова берем отсчет. 7) Разность обоих отсчетов, умноженная на цену деления, дает разность хода. Для самоконтроля рекомендуется: 8) Повернуть столик точно на 90° (на вторую параллельность). Теперь черная полоса сместится в противоположную сторону от центра. 9) Приводим черную полосу в центр и берем отсчет. 10) Разность между этим отсчетом и отсчетом операции 6 дает удвоенную разность хода.

Если исследуемый кристалл настолько велик, что занимает почти все поле зрения, или если, кроме данного кристалла, в поле зрения нет других, работа несколько упрощается, — операция 1 производится в присутствии препарата на столике микроскопа при кристалле, поставленном на погасание. Операции 3 и 5 отпадают. Операция 4 сводится к повороту столика микроскопа на 45° .

Может случиться, что в кристалле разность хода слишком высока и не может быть компенсирована компенсатором Бабины. В этом случае в прорез для пробных пластинок вставляется в положении обратной параллельности относительно кристалла кварцевая пластинка известной разности хода (например, фиолетовая I). Компенсатором измеряют разность хода кристалла, уменьшенную на величину разности хода пластинки (операции 8—10 при этом отпадают, так как после поворота на 90° кристалл оказывается в положении прямой параллельности с пластинкой). Разность хода пластинки предварительно также измеряется компенсатором.

Определение цены деления компенсатора Бабины. Установив компенсатор на микроскопе и скрестив накладной анализатор с поляризатором, приводим на крест нитей полосу фиолетовую I ($\Delta = 550 \text{ м}\mu$). Берем отсчет. Вращаем винт обратно и приводим в центр полосу фиолетовую I, лежащую по другую сторону от темной полосы компенсации. Берем второй отсчет. Разность этих отсчетов соответствует изменению разности хода на $550 \times 2 = 1100 \text{ м}\mu$. Разделив $1100 \text{ м}\mu$ на разность отсчетов, получаем цену деления. Если диапазон движений винта допускает, можно пользоваться полосой фиолетовой II ($\Delta = 1105 \text{ м}\mu$). (Иногда рекомендуется определять константу компенсатора в монохроматическом натровом свете ($\Delta = 589 \text{ м}\mu$). При этом переход от одной темной полосы к соседней соответствует изменению разности хода на $589 \text{ м}\mu$. Мы этот способ рекомендовать не можем, так как цена деления, полученная таким путем, несколько отличается от цены деления компенсатора для белого света.)

Недостатки компенсатора Бабины. Главнейшими недостатками этого компенсатора являются мешкотность и неудобство работы с ним. Кроме того, чтобы отчетливо были заметны смещенные полосы, кристалл должен занимать значительную часть поля зрения. Следовательно, этим компенсатором можно пользоваться только для достаточно больших кристаллов. Сам кристалл при измерении не виден, и при наличии в поле зрения нескольких кристаллов не всегда можно быть уверенным в том, что измеряемое смещение полос соответствует именно данному кристаллу.

§ 5. Компенсатор Берека¹

Этот компенсатор наиболее усовершенствован и удобен в работе.

¹ Идея этого компенсатора заимствована у В. В. Никитина. Компенсатор Никитина в своем первоначальном виде не получил распространения, так как мог применяться только для измерения малых разностей хода.

Устройство и принцип работы. Металлическая оправа *a* (рис. 109) имеет круглое отверстие, внутри которого находится круглая пластинка *b* из исландского шпата (кальцита), вырезанная перпендикулярно к оптической оси. Пластинка эта не прикреплена к оправе компенсатора, а смонтирована на конце оси *c*, скрытой внутри оправы. Вращение винта *d* посредством зубчатого механизма передается этой оси и позволяет выводить кальцитовую пластинку из горизонтального положения. С винтом соединен отсчетный барабан *e*, снабженный нониусом *f*, позволяющим отсчитывать углы поворота с точностью до $0^{\circ},1$. Общий диапазон поворотов пластинки составляет 60° , причем горизонтальному положению ее отвечает отсчет на барабане — 30° . Компенсатор вставляется в имеющийся в тубусе микроскопа прорез для пробных пластинок. Вставлять и вынимать

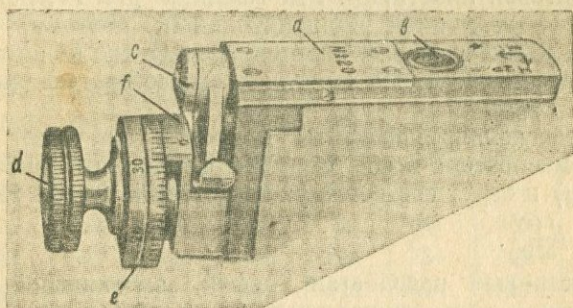


Рис. 109. Компенсатор Берека.

компенсатор, во избежание порчи, только при горизонтальном положении пластинки — отсчет на барабане — 30° .

В скрещенных николях при горизонтальном положении пластинки средняя часть поля зрения будет темной. Если, вращая винт компенсатора, наклонить пластинку в какую-либо сторону, оптическая ось ее выходит из вертикального положения, появляется разность хода, и через центр поля последовательно проходят цвета интерференции четырех-пяти порядков. Такая же картина наблюдается при повороте пластинки в противоположную сторону.

Для определения разности хода исследуемый кристалл, в отсутствие компенсатора или при горизонтальном положении кальциевой пластинки, помещается в центр поля зрения, ставится на погасание и поворачивается ровно на 45° . Вращая винт компенсатора, ищем момент компенсации. Если параллельность между кристаллом и кальциевой пластинкой прямая и компенсации не наблюдается, поворотом столика еще на 90° ставим кристалл в положение обратной параллельности. Вращаем компенсатор в одну сторону до момента компен-

садии кристалла и берем отсчет i_1 , затем поворачиваем компенсатор в противоположную сторону до момента компенсации и берем отсчет i_2 . Один из этих отсчетов больше 30° , другой — меньше. Полуразность этих отсчетов дает i — угол поворота пластинки от горизонтального положения:

$$i = \frac{i_2 - i_1}{2}.$$

Описанный прием определения угла поворота пластинки избавляет от необходимости вводить поправку на возможное несовпадение горизонтального положения пластинки с отсчетом 30° .

Разность хода в компенсаторе Берека является довольно сложной функцией угла поворота пластинки. Эта функция $f(i)$ вычислена для разных значений i и прилагается к компенсатору в виде таблиц или графика. Разность хода, кроме угла поворота, зависит также от толщины кальцитовый пластинки. Эта толщина для каждого компенсатора является величиной индивидуальной; поэтому, прежде чем пользоваться компенсатором, надо определить его константу C , зависящую от толщины. Если константа известна, искомая разность хода $\Delta = C \cdot f(i)$.

Для определения константы приводят на крест нитей поворотом компенсатора в обе стороны фиолетовый цвет I порядка ($\Delta = 550 \text{ м}\mu$) и берут соответствующие отсчеты i_1 и i_2 . Искомая константа $C = \frac{f(i)}{550}$.

$$C = \frac{f(i)}{550}.$$

В. П. Петровым разработан график, заменяющий вычисления при определении силы двупреломления компенсатором Берека.

Компенсатор Берека при малых разностях хода дает точность несколько более высокую, чем компенсатор Бабины, при больших разностях хода — такую же, как последний. Для получения точных результатов надо: 1) помещать кристалл в центр поля зрения; 2) точно находить положение погасания и поворачивать кристалл на 45° от этого положения; 3) диафрагмировать, насколько позволяет освещение, для получения возможно более параллельного света; 4) обязательно повторять измерение i_1 и i_2 несколько раз (минимум 5—10 раз) и в выражении $\frac{i_2 - i_1}{2}$ подставлять средние из этих измерений.

Компенсатор Берека может с большим удобством применяться вместо кварцевого клина для определения знака удлинения. При этом надо иметь в виду, что по длине компенсатора Берека всегда расположено n_g .

Примечание. Это расположение обусловлено отрицательным оптическим знаком кальцита. При горизонтальном положении пластинки, вырезанной перпендикулярно к оптической оси, мы имеем круговое сечение, диаметр которого в отрицательных кристаллах равен n_g . При повороте пластинки вокруг оси компенсатора, вдоль этой оси (т. е. параллельно длине компенсатора) остается n_g , а перпендикулярный диаметр принимает меньшее значение n'_p .

Таблицы к компенсатору Берека

Таблица 1¹10 000 $f(i)$

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0 ⁰	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.1	1.5	1.9	2.5
1	3.0	3.7	4.4	5.1	6.0	6.9	7.8	8.8	9.9	11.0
2	12.2	13.4	14.7	16.1	17.5	19.0	20.6	22.2	23.9	25.6
3	27.4	29.3	31.2	33.2	35.2	37.3	39.5	41.7	44.0	46.3
4	48.7	51.2	53.7	56.3	58.9	61.6	64.4	67.2	70.1	73.1
5	76.1	79.1	82.3	85.5	88.7	92.0	95.4	98.8	102.3	105.9
6	109.5	113.2	116.9	120.7	124.6	128.5	132.5	136.5	140.6	144.8
7	149.0	153.3	157.6	162.0	166.5	171.0	175.6	180.2	184.9	189.6
8	194.5	199.3	204.3	209.3	214.4	219.5	224.6	229.9	235.2	240.5
9	245.9	251.4	257.0	262.6	268.2	273.9	279.7	285.5	291.4	297.4
10	303.4	309.5	315.6	321.8	328.1	334.4	340.7	347.2	353.7	360.2
11	366.8	373.5	380.2	387.0	393.8	400.8	407.7	414.7	421.8	428.9
12	436.1	443.4	450.7	458.1	465.5	473.0	480.6	488.2	495.8	503.5
13	511	519	527	535	543	551	559	567	576	584
14	592	601	609	618	626	635	644	653	661	670
15	679	688	697	706	716	725	734	743	753	762
16	772	781	791	801	810	820	830	840	850	860
17	870	880	890	901	911	921	932	942	953	963
18	974	985	996	1006	1017	1028	1039	1050	1061	1072
19	1084	1095	1106	1118	1129	1141	1152	1164	1175	1187
20	1199	1211	1222	1234	1246	1258	1270	1283	1295	1307
21	1319	1332	1344	1357	1369	1382	1394	1407	1420	1432
22	1445	1458	1471	1484	1497	1510	1523	1537	1550	1563
23	1577	1590	1603	1617	1631	1644	1658	1672	1685	1699
24	1713	1727	1741	1755	1769	1783	1797	1812	1826	1840
25	1855	1869	1884	1898	1913	1927	1942	1957	1972	1987
26	2001	2016	2032	2046	2062	2077	2092	2107	2123	2138
27	2153	2169	2184	2200	2215	2231	2247	2262	2278	2294
28	2310	2326	2342	2358	2374	2390	2407	2422	2439	2455
29	2471	2488	2504	2521	2537	2554	2570	2587	2604	2620
30	2637	2654	2671	2688	2705	2722	2739	2756	2773	2791
31	2808	2825	2843	2860	2877	2895	2912	2930	2947	2965

¹ В этой таблице значения $f(i)$ увеличены в 10 000 раз для того, чтобы избежать от большого количества нулей. Соответственно, взятые из таблицы значения надо умножать не на C , а на $\frac{C}{10\,000}$.

Таблица II¹ $\log f(i)$

<i>i</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0°	—	4.484	5.083	5.438	5.688	5.882	6.040	6.174	6.290	6.392
1	6.484	6.566	6.642	6.712	6.776	6.836	6.892	6.945	6.994	7.041
2	7.086	7.128	7.169	7.207	7.244	7.280	7.314	7.346	7.378	7.408
3	7.438	7.466	7.494	7.521	7.547	7.572	7.596	7.620	7.643	7.666
4	7.688	7.709	7.730	7.750	7.770	7.790	7.809	7.828	7.846	7.864
5	7.881	7.893	7.915	7.932	7.948	7.964	7.980	7.995	8.010	8.025
6	8.039	8.054	8.068	8.082	8.095	8.109	8.122	8.135	8.148	8.161
7	8.173	8.185	8.198	8.210	8.221	8.232	8.244	8.256	8.267	8.278
8	8.289	8.300	8.310	8.321	8.331	8.341	8.352	8.361	8.371	8.381
9	8.391	8.400	8.410	8.419	8.429	8.438	8.447	8.456	8.465	8.473
10	8.482	8.491	8.499	8.508	8.516	8.524	8.532	8.541	8.549	8.557
11	8.564	8.572	8.580	8.588	8.595	8.603	8.610	8.618	8.625	8.632
12	8.640	8.647	8.654	8.661	8.668	8.675	8.682	8.689	8.695	8.702
13	8.709	8.715	8.722	8.728	8.735	8.741	8.748	8.754	8.760	8.766
14	8.773	8.779	8.785	8.791	8.797	8.803	8.809	8.815	8.820	8.826
15	8.832	8.838	8.843	8.849	8.855	8.860	8.866	8.871	8.877	8.882
16	8.888	8.893	8.898	8.904	8.909	8.914	8.919	8.924	8.929	8.935
17	8.940	8.945	8.950	8.955	8.960	8.965	8.969	8.974	8.979	8.984
18	8.989	8.993	8.998	9.003	9.007	9.012	9.017	9.021	9.026	9.030
19	9.035	9.039	9.044	9.048	9.053	9.057	9.062	9.066	9.070	9.075
20	9.079	9.083	9.087	9.092	9.096	9.100	9.104	9.108	9.112	9.116
21	9.120	9.124	9.128	9.132	9.136	9.140	9.144	9.148	9.152	9.156
22	9.160	9.164	9.168	9.172	9.175	9.179	9.183	9.187	9.190	9.194
23	9.198	9.201	9.205	9.209	9.212	9.216	9.220	9.223	9.227	9.230
24	9.234	9.237	9.241	9.244	9.248	9.251	9.255	9.258	9.262	9.265
25	9.268	9.272	9.275	9.279	9.282	9.285	9.288	9.292	9.295	9.298
26	9.301	9.305	9.308	9.311	9.314	9.318	9.321	9.324	9.327	9.330
27	9.333	9.336	9.339	9.343	9.346	9.349	9.352	9.355	9.358	9.361
28	9.364	9.367	9.370	9.373	9.376	9.379	9.382	9.384	9.387	9.390
29	9.393	9.396	9.399	9.402	9.405	9.407	9.410	9.413	9.416	9.419
30	9.421	9.424	9.427	9.430	9.432	9.435	9.438	9.441	9.443	9.446
31	9.448	9.451	9.454	9.456	9.459	9.462	9.464	9.467	9.469	9.472

¹ Как всегда, вместо умножения чисел удобнее складывать их логарифмы. Поэтому дается таблица логарифмов $f(i)$.

$$\lg \Delta = \lg C + \lg f(i).$$

$\lg C$ находится раз навсегда и записывается. Получив $\lg \Delta$, находим Δ по обыкновенной таблице логарифмов чисел (таблица III).

Логарифмы чисел

Таблица III

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	000	001	009	013	017	021	025	029	033	037
11	011	045	049	053	057	061	064	068	072	076
12	079	083	085	090	093	097	100	104	107	111
13	114	117	121	124	127	130	134	137	140	143
14	146	149	152	155	158	161	164	167	170	173
15	176	179	181	185	188	190	193	195	199	201
16	204	207	210	212	215	217	220	223	225	228
17	230	233	233	238	241	243	246	248	250	253
18	255	258	260	262	265	267	270	272	274	276
19	279	281	283	286	288	290	292	294	297	299
20	301	303	305	307	310	312	314	316	318	320
21	322	324	326	328	330	332	334	335	338	340
22	342	344	346	348	350	352	354	356	358	360
23	362	364	365	367	369	371	373	375	377	378
24	380	382	384	386	387	389	391	393	394	396
25	398	400	401	403	405	407	408	410	412	413
26	415	417	418	420	422	423	425	427	428	430
27	431	433	435	436	438	439	441	442	444	446
28	447	449	450	452	453	455	456	458	459	461
29	462	464	465	467	468	470	471	473	474	476
30	477	479	480	481	483	484	486	487	489	490
31	491	493	494	496	497	498	500	501	502	504
32	505	507	508	509	511	512	513	515	516	517
33	519	520	521	522	524	525	526	528	529	530
34	531	533	534	535	537	533	539	540	542	543
35	544	545	547	548	549	550	551	553	554	555
36	556	558	559	560	561	562	563	565	566	567
37	568	569	571	572	573	574	575	576	577	579
38	580	581	582	583	584	585	587	588	589	590
39	591	592	593	594	595	597	598	599	600	601
40	602	603	604	605	606	607	609	610	611	612
41	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622
42	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632
43	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642
44	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652
45	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662
46	663	664	665	666	667	667	668	669	670	671
47	672	673	674	675	676	677	678	679	679	680
48	681	682	683	684	685	686	687	688	688	689
49	690	691	692	693	694	695	695	695	697	698
50	699	700	701	702	702	703	704	705	706	707
51	708	708	709	710	711	712	713	713	714	715
52	716	717	718	718	719	720	721	722	723	723
53	724	725	726	727	728	728	729	730	731	732
54	732	733	734	735	736	737	737	738	739	740
55	740	741	742	743	744	744	745	745	747	747
56	748	749	750	751	751	752	753	754	754	755
57	756	757	757	758	759	760	760	761	762	763
58	763	764	765	766	766	767	768	769	769	770
59	771	772	772	773	774	775	775	776	777	777
60	778	779	780	780	781	782	782	783	784	785
61	785	786	787	787	788	789	790	790	791	792
62	792	793	794	794	795	795	797	797	798	799
63	799	800	801	801	802	803	803	804	805	805

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
64	806	807	808	808	809	810	810	811	812	812
65	813	814	814	815	816	816	817	818	818	819
66	820	820	821	822	822	823	823	824	825	825
67	826	827	827	828	829	829	830	831	831	832
68	833	833	834	834	835	836	836	837	838	838
69	839	839	840	841	841	842	843	843	844	844
70	845	846	846	847	848	848	849	849	850	851
71	851	852	852	853	854	854	855	856	856	857
72	857	858	859	859	860	860	861	862	862	863
73	863	864	865	865	866	866	867	867	868	869
74	869	870	870	871	872	872	873	873	874	874
75	875	876	876	877	877	878	879	879	880	880
76	881	881	882	883	883	884	884	885	885	886
77	886	887	888	888	889	889	890	890	891	892
78	892	893	893	894	894	895	895	896	897	897
79	898	898	899	899	900	900	901	901	902	903
80	903	904	904	905	905	906	906	907	907	908
81	908	909	910	910	911	911	912	912	913	913
82	911	914	915	915	916	916	917	917	918	919
83	919	920	920	921	921	922	922	923	923	924
84	924	925	925	926	926	927	927	928	928	929
85	929	930	930	931	931	932	932	933	933	934
86	934	935	936	936	937	937	938	938	939	939
87	940	940	941	941	942	942	942	943	943	944
88	944	945	945	946	946	947	947	948	948	949
89	949	950	950	951	951	952	952	953	953	954
90	954	955	955	956	956	957	957	958	958	959
91	959	960	960	960	961	961	962	962	963	963
92	964	964	965	965	966	966	967	967	968	968
93	968	969	969	970	970	971	971	972	972	973
94	973	974	974	975	975	975	976	976	977	977
95	978	978	979	979	980	980	980	981	981	982
96	982	983	983	984	984	985	985	985	986	986
97	987	987	988	988	989	989	989	990	990	991
98	991	992	992	993	993	993	994	994	995	995
99	996	996	997	997	997	998	998	999	999	000

§ 6. Таблица Мишель-Леви. Приближенное суждение о величине двупреломления

Найдя разность хода и толщину кристалла, можно силу двупреломления либо вычислить, как указывалось выше, либо найти графически с помощью таблицы, предложенной французским петрографом Мишель-Леви (1883).

В этой таблице (рис. 110) по горизонтальной оси нанесены разности хода, а по вертикальной — толщины шлифов. Из начала координат радиально расходятся наклонные прямые линии, каждая из которых отвечает определенному значению силы двупреломления.¹ Эти значе-

¹ Выражение $\frac{\Delta}{d} = n_g - n_p$ представляет при переменных Δ и d уравнение прямой, проходящей через начало координат.

ния указаны при выходе линий на верхнем и правом краях таблицы. Вся площадь таблицы закрашена вертикальными полосами интерференционных цветов, соответствующих указанным на горизонтальной оси разностям хода. Для определения силы двупреломления находят

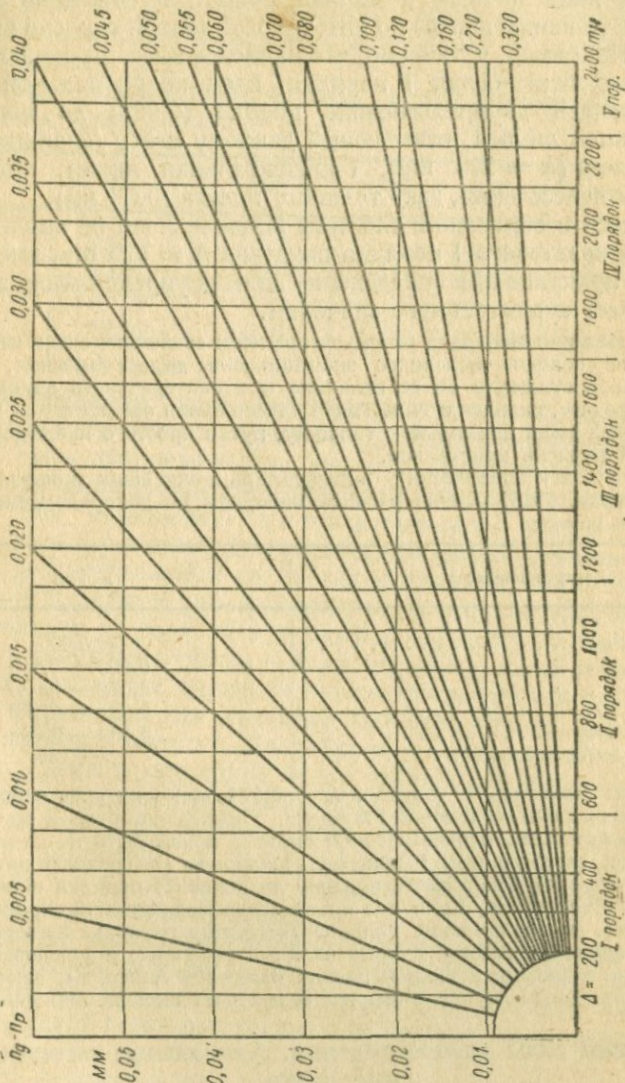


Рис. 110. Таблица Мишель-Леви (схематический чертеж).

точку пересечения горизонтальной линии, соответствующей данной толщине d , с вертикальной, отвечающей измеренной разности хода Δ . По радиальной прямой, проходящей через эту точку, выходят на край таблицы и читают соответствующую силу двупреломления. Если определение разности хода велось с помощью кварцевого клина (путем

определения порядка окраски), можно, не находя по шкале величины разности хода, найти точку пересечения горизонтальной линии, соответствующей толщине шлифа, с вертикальной полосой, отвечающей интерференционной окраске кристалла.

Таблица Мишель-Леви позволяет решать и обратную задачу — нахождение толщины шлифа по интерференционной окраске известного минерала. Например, установив, что наиболее высокая окраска кварца в шлифе желтовато-белая I порядка, идем по радиальной прямой, соответствующей двупреломлению кварца (0,009) до пересечения с вертикальной линией, отвечающей данному цвету (граница белой и желтой полос) ($\Delta = 270 \text{ м}\mu$). Горизонтальная линия, проходящая через точку пересечения, дает толщину шлифа (0,03 мм).

Имеющиеся в обращении таблицы Мишель-Леви не вполне точны: в них для фиолетового I порядка показана $\Delta = 575 \text{ м}\mu$, вместо 550—555 м μ . На практике при определении силы двупреломления эта неточность не имеет существенного значения.

При определении минерала по его оптическим свойствам очень часто бывает достаточно, не находя численного значения силы двупреломления, составить приблизительное суждение об ее величине и характеризовать двупреломление как слабое, среднее, сильное и т. п. Такая качественная оценка может быть легко дана, если шлиф имеет нормальную толщину, путем простого наблюдения интерференционной окраски кристаллов.

По Б. Попову (Оптический определитель важнейших минералов горных пород. Петроград, 1916) удобно разбить минералы по двупреломлению на следующие шесть групп:

Двупреломление	$n_g - n_p$ ¹
1. Очень слабое	< 0,005
2. Слабое	0,005 — 0,010
3. Среднее	0,010 — 0,025
4. Сильное	0,025 — 0,100
5. Очень сильное	0,100 — 0,180
6. Исключительно сильное	> 0,180

В шлифах нормальной толщины ($d \sim 0,027$ мм) минералы первой группы не будут иметь окраски выше серой I порядка. У минералов второй группы в разрезах с максимальным двупреломлением окраска может быть не ниже светлосерой и не выше светложелтой I порядка. Минералы со средним двупреломлением (третья группа) могут иметь окраску до синей II порядка включительно. Зеленые тона отсутствуют. Если при яркой интерференционной окраске имеются и зеленые тона, двупреломление сильное (четвертая группа). Минералы пятой группы обнаруживают наряду с более низкими розоватые и зеленоватые перламутровые тона. Наконец, к шестой группе относятся минералы, дающие в разрезах с максимальным двупреломлением белый цвет высших порядков.

§ 7. Дисперсия силы двупреломления. Аномальные интерференционные цвета

Дисперсия показателей преломления, о которой мы говорили в введении (§ 5), обуславливает собой дисперсию силы двупреломления, т. е. разную величину силы двупре-

¹ Цифры этого столбца несколько изменены.

ломления одного и того же вещества для света различных длин волн.

Дисперсия силы двупреломления есть общее свойство всех двупреломляющих кристаллов, но у огромного большинства веществ она настолько мала, что практически можно считать силу двупреломления этих веществ одинаковой для всех длин волн. В качестве примера приведем кварц.

Показатели преломления и сила двупреломления кварца для света разных длин волн:

λ, μ	795	656	589	527	486	396
n_g	1,5474	1,5509	1,5534	1,5564	1,5590	1,5678
n_p	1,5385	1,5419	1,5443	1,5472	1,5497	1,5582
$n_g - n_p$	0,0039	0,0090	0,0091	0,0092	0,0093	0,0096

Из этой таблички видно, что практически $n_g - n_p$ кварца можно для всех длин волн считать равной 0,009. Лишь у немногих минералов дисперсия силы двупреломления достигает существенной величины.

Дисперсия силы двупреломления, если она значительна, вызывает появление так называемых аномальных интерференционных окрасок. Дело в том, что нормальные цвета интерференции, рассмотренные в гл. VI, представляют собой Ньютоновы цвета тонких пластинок, которые получаются при интерференции лучей, отраженных от верхней и нижней поверхностей тонкой пленки изотропного вещества (пример — всем известные цвета пленок масла на воде). В кристаллах эти цвета наблюдаются при условии, что разность хода в кристалле для всех длин волн одна и та же, как это имеет место в масляных пленках. Выражение $\Delta = (n_g - n_p) d$ показывает, что разность хода в кристалле будет одинаковой для разных волн только, если отсутствует дисперсия силы двупреломления. При наличии же этой дисперсии разность хода для лучей разных длин волн оказывается различной, и в результате интерференции получаются своеобразные аномальные окраски, отсутствующие в нормальной ньютоновской шкале.

Своеобразные фиолетово-синие и оливково-зеленые аномальные цвета, наблюдаемые в шлифах при небольших разностях хода, служат хорошим диагностическим признаком для немногих минералов, которые обладают резко выраженной дисперсией силы двупреломления.

Характер дисперсии силы двупреломления у разных минералов различен. У одних минералов сила двупреломления для длинных волн больше, чем для коротких (супернормальная окраска по Бекке). Примеры: эпидот, некоторые апофиллиты. У других, наоборот, сила двупреломления для длинных волн меньше, чем для коротких (субнормальная окраска по Бекке). Примеры: клинохлор, брусит.

Наконец, сила двупреломления может достигать своего минимума в средней части спектра, подымаясь к его концам, причем меняется оптический знак кристалла (анормальная окраска по Бекке). Одноосные кристаллы, обладающие такой дисперсией, имеют для одного конца спектра положительный (вытянутый) эллипсоид, для другого — отрицательный (сплюснутый). Для некоторой длины волны в средней части спектра индикатриса имеет форму шара, а двупреломление равно нулю. Пример: некоторые везувианы.

Неодинаковый характер дисперсии силы двупреломления у различных минералов сказывается и при слабой дисперсии в случае большой разности хода. Он является причиной того, что при больших разностях хода компенсация получается менее четко и даже может быть вообще незаметна. Дело в том, что, вследствие дисперсии, волны разной длины, входящие в состав данной интерференционной окраски, имеют неодинаковую разность хода (это различие возрастает при увеличении Δ). Если в компенсаторе характер дисперсии иной, чем в исследуемом кристалле, полной компенсации не может наступить одновременно для всех длин волн.

Характер дисперсии силы двупреломления минерала устанавливается путем измерений разности хода в монохроматическом свете разных длин волн.

§ 8. Получение монохроматического света. Понятие об определении разности хода в монохроматическом свете

Монохроматический свет, пригодный для целей микроскопии, получается при свечении Гейслеровых трубок, содержащих различные газы, или при введении солей натрия, лития, талия и других металлов в бесцветное пламя Бунзеновской или Бартелевской горелки. Можно также пользоваться ртутной дугой в комбинации с монохроматором или со светофильтром, поглощающим все яркие линии спектра ртути кроме одной. При измерении разности хода обычно нельзя пользоваться белым светом в комбинации со светофильтром, так как получающийся при этом свет недостаточно монохроматичен. В петрографических лабораториях, где специальная аппаратура не всегда имеется, чаще всего применяют бесцветное пламя, окрашенное парами металлов. Источником пламени, если лаборатория снабжена газом, служит обыкновенная Бунзеновская горелка. При отсутствии газа применяется горелка Бартеля или любая паяльная лампа, дающая высокотемпературное бесцветное пламя. Для получения желтого натрового света ($\lambda = 589 \text{ м}\mu$) в пламя вводится лоскуток асбеста, пропитанный

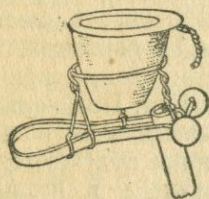


Рис. 111. Насадка на газовую горелку для получения монохроматического света.

раствором соды или сернистого натрия (хлористый натрий менее удобен, так как растрескивается и разбрасывается при нагревании). Можно ввести в пламя сплавленный на платиновой проголке, загнутой на конце в колечко, шарик (перл) соды. Такого шарика (диаметром около 2 мм) хватает на 20—30 минут работы. Очень удобна следующая насадка на газовую горелку. Сбоку, несколько выше горелки, помещается небольшой платиновый тигель (рис. 111), наполненный солью (лучше всего — смесь соды и поваренной соли) и прикрытый платиновой крышечкой. В соль опущен фитиль, сплетенный из тонкой платиновой проволоки. Выходящий наружу конец фитиля загнут книзу и на-

ходится над горелкой. Расплавленная соль поднимается по фитилю и стекает в пламя, давая интенсивное желтое окрашивание.

Для получения света других длин волн чаще всего употребляют соли талия ($\lambda = 535$ м μ), лития ($\lambda = 670$ м μ) и калия ($\lambda = 768$ м μ).

Работа с компенсатором в монохроматическом свете. Как отмечалось в гл. VI, в монохроматическом свете вместо интерференционных цветов в кварцевом клине (а также и в других компенсаторах) наблюдается лишь чередование темных и светлых полос. Переход от данной темной полосы к соседней соответствует изменению разности хода на длину волны применяемого монохроматического света. Пользуясь этим, определяют константу компенсатора для данного света. В монохроматическом свете нельзя отличить темную полосу компенсации ($\Delta = 0$) от полос, отвечающих разности хода, равной любому целому числу волн. Поэтому измерения ведут сначала в белом свете. Добившись приблизительной компенсации (полная компенсация при сильной дисперсии не получается) и измерив соответствующую разность хода, определяют, сколько целых длин волн данного монохроматического света содержится в разности хода кристалла. После этого переходят к монохроматическому освещению и измеряют излишек разности хода сверх целого числа длин волн. При больших разностях хода, в случае сильной дисперсии, возможны просчеты на одну и даже несколько λ .

Глава X

ПЛЕОХРОИЗМ

§ 1. Собственная окраска кристаллов. Плеохроизм

Кристаллы, как и изотропные тела, могут быть бесцветными или окрашенными. Свет, проходящий через любое тело, как бы прозрачно оно ни было, частично им поглощается (абсорбируется) и, следовательно, ослабляется.

Если тело ослабляет лучи всех цветов в одинаковой степени, состав света при прохождении сквозь него не меняется: белый свет остается белым, тело является бесцветным. Если же лучи разных цветов поглощаются телом не в одинаковой степени, т. е. тело, как говорят, обладает избирательным поглощением, белый свет, пройдя сквозь него, не останется белым, так как некоторые лучи из входящих в его состав будут ослаблены больше, чем другие. Тело будет казаться окрашенным. Таким образом, окраска тел в проходящем свете есть следствие избирательного поглощения (абсорбции) ими света.

Густота окраски зависит от поглощающей способности вещества и от толщины слоя. Одно и то же вещество в толстом слое будет казаться густо окрашенным или даже непрозрачным, а в тонком слое — бледно окрашенным или совсем бесцветным. Поэтому в петрографических шлифах почти все минералы оказываются прозрачными и в большинстве случаев бесцветными или слабо окрашенными.

Все изложенное в предыдущей части книги одинаково относилось как к бесцветным, так и к цветным кристаллам. В настоящей главе речь идет исключительно о кристаллах окрашенных. (Собственная окраска кристаллов, конечно, наблюдается без верхнего николя. В скрещенных николях она маскируется интерференционной окраской.)

Анизотропность кристаллов, обуславливающая своеобразие их физических свойств, проявляется и в отношении окраски; поглощение света в кристаллах в общем случае различно для лучей, колеблющихся по разным направлениям. Если изменять направление колебаний света, проходящего сквозь кристалл, одновременно будет изменяться его окраска. Изменение окраски кристалла в зависимости от направления световых колебаний называется плеохроизмом.¹ Плеохроизм можно обнаружить, если, удалив анализатор, вращать столик микроскопа и следить за находящимися в поле зрения окрашенными кристаллами. Кристаллы, обладающие плеохроизмом, будут при этом

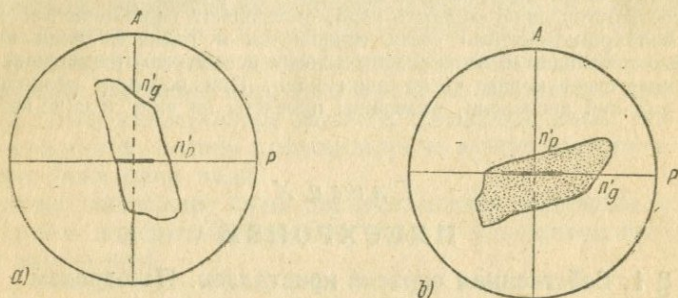


Рис. 112. Исследование плеохроизма. Кристалл в положении *a*) — светложелтый, в положении *b*) — темнокоричневый. Направление колебаний в нижнем николе горизонтально (*P*): направлению n'_p — соответствует светложелтая окраска; n'_g — темнокоричневая.

менять свой цвет или густоту окраски. Если при скрещенных николях поставить кристалл на погасание, а затем удалить анализатор, мы увидим окраску, соответствующую одному из двух направлений колебаний данного сечения. (Из гл. II, § 7 мы знаем, что в момент погасания через кристалл идет только один луч, колебания которого параллельны колебаниям поляризатора.)

Чтобы увидеть окраску, отвечающую второму направлению колебаний в данном сечении кристалла, надо это второе направление совместить с направлением колебаний поляризатора; для этого, вдвинув николь, поворачиваем кристалл до следующего положения погасания (поворот на 90°). При промежуточных положениях кристалла через него одновременно проходят два луча, и мы видим смесь обеих окрасок, в которой, в зависимости от положения кристалла в данный момент, преобладает то одна, то другая из главных окрасок данного сечения.

Если известно направление колебаний в нижнем николе и определено наименование осей данного сечения кристалла, легко определить, какая из двух окрасок, наблюдаемых в положениях погасания, соответствует колебанию n'_g и какая — n'_p (рис. 112).

¹ Плеохроизм или полихроизм буквально — многоцветность.

§ 2. Понятие об эллипсоиде поглощения. Плеохроизм в кристаллах разных сингоний

Поглощение света, как и многие другие физические свойства кристаллов, подчиняется закону эллипсоида. Если в кристалле по каждому направлению отложить отрезок, пропорциональный поглощению света в этом направлении для какой-либо определенной длины волны, получим эллипсоид поглощения кристалла для света данной длины волны. (В изотропных телах и кристаллах кубической сингонии получим шар.) Если кристалл окрашен, т. е. лучи разной длины волны поглощаются им неодинаково, эллипсоиды для разных лучей будут различными также и по форме (более или менее вытянутыми или сплюснутыми).

На практике можно встретиться со следующими случаями: 1) Эллипсоиды поглощения для всех лучей мало отличаются по форме от шара — плеохроизм выражен очень слабо или совсем не наблюдается. 2) Эллипсоиды поглощения для разных лучей, отличаясь по форме от шара и отличаясь друг от друга по величине, имеют почти одинаковую форму (подобны друг другу). В этом случае сама окраска кристалла почти не меняется с изменением направления колебаний. Меняется только густота окраски. Это явление вместо плеохроизма часто обозначают термином абсорбция, подразумевая различную абсорбцию (поглощение) света для разных направлений. 3) Эллипсоиды поглощения для разных цветов отличаются и по величине и по форме. В этом случае будет меняться сама окраска. Густота окраски (степень абсорбции) для разных направлений будет также различной или будет оставаться почти одинаковой.

Тип и ориентировка эллипсоида поглощения в кристаллах подчиняются законам, выведенным для оптической индикатрисы (гл. IV, § 5).

В кристаллах средних сингоний имеем эллипсоид вращения, ось которого совпадает с оптической осью. В разрезе, перпендикулярном к оптической оси, плеохроизм вовсе не обнаруживается: все время видна одна окраска, соответствующая колебаниям обыкновенного луча. В косых разрезах плеохроизм тем сильнее, чем больше угол между оптической осью и нормалью к шлифу, причем окраска луча o во всех разрезах одна и та же. Наиболее резко выражен плеохроизм в разрезе, параллельном оптической оси, где можно наблюдать обе главные окраски — по направлению оптической оси (колебания луча e) и по перпендикулярному направлению (колебания луча o).

Чтобы охарактеризовать плеохроизм одноосного кристалла, надо наблюдать изменение окраски именно в этом разрезе. Находят в шлифе разрез, параллельный оптической оси, по его относительно более резкому плеохроизму и по признакам, указанным в гл. IX, § 1.

Общий термин плеохроизм в отношении одноосных кристаллов часто заменяют термином дихроизм (двучетность), так как одноосный кристалл характеризуется двумя главными окрасками.

В кристаллах низших сингоний имеем трехосный эллипсоид поглощения, оси которого в ромбической сингонии совпадают с осями

оптической индикатрисы. В *моноклинной* сингонии совпадение обязательно только для одной из осей. В *триклинной* сингонии все три оси эллипсоида поглощения могут не совпадать с осями оптической индикатрисы.

Чтобы охарактеризовать плеохроизм двуосного кристалла, необходимо наблюдать три окраски, соответствующие трем главным направлениям (*т р и х р о и з м*). На практике по чисто техническим причинам игнорируется возможное несовпадение осей оптической индикатрисы с осями эллипсоида поглощения, и за главные направления последнего берутся оси n_g , n_m и n_p .

Наблюдать окраску, соответствующую всем трем главным осям, в одном разрезе нельзя. Чтобы охарактеризовать плеохроизм двуосного кристалла, надо иметь по крайней мере два ориентированных разреза (например, \perp О. Б. и \perp n_m или \perp О. Б. и \perp Т. Б.). В разрезе, перпендикулярном к оптической оси, если в нем плеохроизм не заметен, ¹ наблюдаемая окраска соответствует оси n_m . В косых разрезах обе наблюдаемые окраски являются промежуточными между окрасками трех главных осей эллипсоида.

§ 3. Наблюдение плеохроизма кристаллов под микроскопом

Существуют методы, позволяющие точно характеризовать эллипсоид поглощения в отношении его ориентировки и величины осей, но в петрографическую практику эти методы пока не вошли и нами здесь не излагаются. При изучении и определении кристаллов обычно удовлетворяются визуальным наблюдением и описанием окраски кристаллов. Как производится это наблюдение, в общих чертах сказано в § 1 настоящей главы. Здесь коснемся некоторых деталей.

Определение направления колебаний в николе. При исследовании всех разобранных выше оптических явлений в кристаллах, не было необходимости определять направления колебаний, пропускаемых каждым из николей в отдельности. Достаточно было знать, что эти направления взаимно перпендикулярны и параллельны нитям окулярного креста. Исследование же плеохроизма невозможно, если неизвестно, параллельно какой именно из нитей совершаются колебания в нижнем николе (поляризаторе).

Чтобы показать это, вернемся к рис. 112, *a* и *b*, где изображен кристалл, у которого окраска по n_p — светложелтая, а по n'_g — темнокоричневая. Пусть нам неизвестно направление колебаний поляризатора, и мы произвольно отнесем его к вертикальной нити (а не к горизонтальной, как показано на рисунке). Тогда светложелтая окраска, наблюдаемая в положении *a* будет нами связана с направлением колебаний n'_g , которое в этот момент расположено вертикально, а не с направлением n'_p . Аналогично из рис. 112, *b* получим, что темнокоричневая окраска связана с n'_p , а не с n'_g . Таким образом, допустив

¹ Круговые сечения эллипсоидов поглощения не обязательно должны совпадать с круговыми сечениями индикатрисы. Поэтому, теоретически, слабый плеохроизм может наблюдаться и в разрезе, перпендикулярном к оптической оси.

ошибку в предположении об ориентировке поляризатора, мы получили схему плеохроизма обратную фактической.

Обычно ориентировка поляризатора определяется по минералу-схема плеохроизма которого известна. Чаще всего используется для

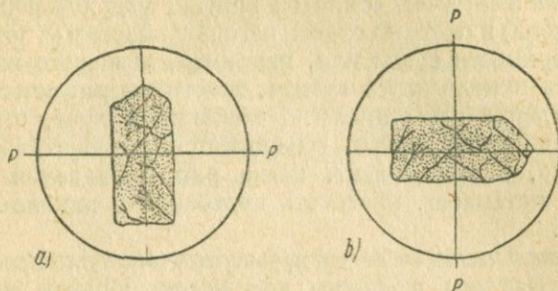


Рис. 113. Густота окраски турмалина максимальна, когда ребра призмы перпендикулярны к направлению колебаний луча, вышедшего из поляризатора. Поляризатор ориентирован: а) — параллельно горизонтальной нити; б) — параллельно вертикальной нити.

этого турмалин или биотит. Оба эти минерала отрицательны и имеют по n_g более темную окраску, чем по n_p . У турмалина n_g расположено перпендикулярно к удлинению, у биотита — в плоскости спайности.

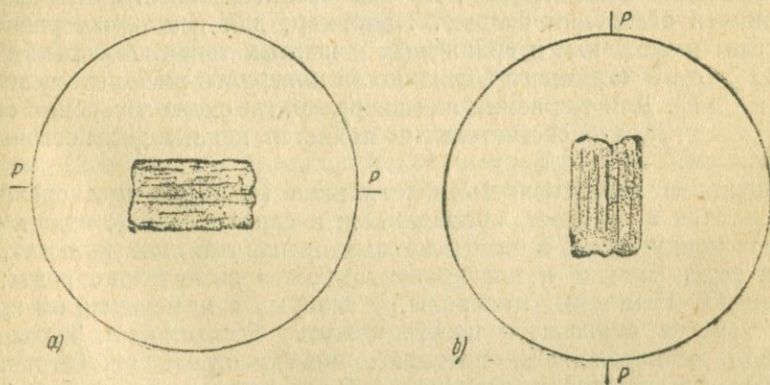


Рис. 114. Густота окраски биотита максимальна, когда трещины спайности параллельны направлению колебаний луча, вышедшего из поляризатора. Поляризатор ориентирован: а) — параллельно горизонтальной нити; б) — параллельно вертикальной нити.

Наблюдая положение кристалла, при котором густота его окраски максимальна, и определяют направление колебаний в поляризаторе (рис. 113 и 114).

Если под рукой нет шлифа с таким минералом, направление колебаний в николе определяют, наблюдая сквозь него луч, отраженный

от любой неметаллической (лучше темной) поверхности. Мы знаем, что такой луч частично поляризован, и колебания его совершаются параллельно поверхности, от которой произошло отражение (гл. II, § 2). Вынимаем николю из микроскопа (удобнее это сделать не с поляризатором, а с анализатором, отвинтив винтик, удерживающий его в тубусе микроскопа) и смотрим сквозь него под пологим углом на световой блик на поверхности стола или, например, лежащего на столе портфеля. Вращая николю перед глазом, заметим периодическое потемнение и посветление поверхности. Колебания в луче, отраженном от горизонтальной поверхности, совершаются горизонтально (рис. 16). Следовательно, в тот момент, когда рассматриваемая поверхность максимально потемнеет, плоскость колебаний в николе расположена вертикально.

Последовательность операций при исследовании плеохроизма и запись результатов. Влияние толщины кристалла. Прежде всего, найдя нужный разрез, обычными методами определяем ориентировку и наименование осей данного разреза. Затем ставим кристалл на погасание и выдвигаем анализатор. Зарисовываем положение кристалла. Отмечаем направление колебаний поляризатора и наименование совпадающей с ним оси в кристалле. Записываем, какой цвет соответствует данной оси. Ставим кристалл на следующее погасание и делаем вторую зарисовку (рис. 112 а и б). Результат записываем: окраска по n_g — темнокоричневая, по n_p — светложелтая. Если меняется не столько оттенок окраски, сколько ее интенсивность, отмечают, по какой оси абсорбция больше. Например, для некоторых разностей биотита: плеохроизм в оранжевых и желтых тонах. Абсорбция $n_g = n_m > n_p$. У огромного большинства минералов имеем схему абсорбции $n_g > n_p$. Для тех немногих минералов, где схема абсорбции обратная ($n_g < n_p$), это обстоятельство является ценным диагностическим признаком.

Оценивая интенсивность плеохроизма (особенно при сравнении результатов с данными, приводимыми в справочниках), надо учитывать толщину зерен. В иммерсионных препаратах, как правило, толщина зерен больше и плеохроизм выражен значительно резче, чем в шлифах. Некоторые минералы, у которых в иммерсионном препарате заметна окраска, в шлифе кажутся бесцветными. Турмалины часто в иммерсионном препарате плеохроизируют от бесцветного (по n_p) до совершенно темного (по n_g). В шлифах эти же турмалины обнаруживают по n_g темнозеленую или коричневую окраску.

Дихроскоп. Для обнаружения очень слабого плеохроизма служит прибор, называемый дихроскопом. Наиболее распространенная конструкция представляет собой окуляр с помещенным внутри кристаллом исландского шпата. Последний дает одновременно два изображения кристалла, соответствующие двум направлениям колебаний. Эти изображения при наличии плеохроизма различно окрашены.

Направления колебаний в кристалле должны быть установлены параллельно направлениям колебаний в дихроскопе. Лучше, если при этом удалены оба николя. Если же поляризатор оставлен, то кристалл и дихроскоп должны быть повернуты по отношению к нему на 45° .

§ 4. Псевдохроизм и псевдодихроизм

Е. С. Федоров назвал псевдохроизмом явление окраски, наблюдаемой в некоторых вообще бесцветных кристаллах, сложенных из очень тонких пластинок с различными показателями преломления (например, некоторые микропертиты и кристаллы, полученные при совместной кристаллизации парадибромбензола и нафталина). Такие кристаллы под микроскопом в неполяризованном свете (без обеих николей) в центре поля зрения кажутся коричневыми, а на краю поля зрения — зеленоватыми. В поляризованном свете (при одном николе) наблюдается сильный дихроизм в коричневых тонах — псевдодихроизм. Явления эти обусловлены преломлением, поляризацией и дисперсией света в телах, состоящих из многочисленных очень тонких пластинок. Такой дихроизм (псевдодихроизм) в случае, если он обнаружен в кристаллах, не имеющих собственной окраски (белых в отраженном свете), служит указанием на их тонкопластинчатую структуру.

Глава XI

СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В ШЛИФАХ

§ 1. Шагреновая поверхность и рельеф зерен. Псевдоабсорбция

Верхняя и нижняя поверхности шлифа всегда имеют на себе микроскопические неровности, получающиеся в процессе шлифования. Сверху и снизу шлифа находится канадский бальзам с показателем преломления около 1,54. Если показатель преломления минерала значительно отличается от этой величины, неровности на его поверхности резко заметны, вследствие происходящего на них преломления и полного внутреннего отражения лучей. Поверхность зерна кажется шероховатой подобно шагреновой коже или ватманской бумаге. Если, наоборот, показатель преломления минерала близок к 1,54, неровности на поверхности зерна не будут изменять ход лучей и не будут заметны. Поверхность будет казаться совершенно гладкой. Если к тому же минерал бесцветен, он будет почти не отличим от канадского бальзама, заполняющего пустоты шлифа.

Шагреновая поверхность выражена тем сильнее, чем больше разница (в ту или другую сторону) между показателями преломления минерала и канадского бальзама.¹

При некотором навыке можно, основываясь на характере шагреновой поверхности, судить о величине этой разницы. При этом надо иметь в виду, что шагрень резче видна при близком к перпендикулярному ходу лучей (закрытая диафрагма). При полностью открытой диафрагме и введенном конденсоре (линзе Лазо) она почти совершенно не заметна.

Минералы, сильно отличающиеся по показателю преломления от окружающей среды, имеют, кроме резко выраженной шагреновой поверхности, широкие темные ограничения и кажутся выступающими

¹ В непокрытых шлифах, где верхняя поверхность зерен непосредственно граничит с воздухом, шагрень выражена очень резко на всех минералах.

из плоскости шлифа; они, как говорят, имеют рельеф. Опытный глаз различает рельеф положительный, когда показатель зерна значительно больше, чем показатель окружающей среды, — зерно кажется выше общей поверхности шлифа, — и отрицательный, когда показатель зерна ниже показателя среды, — оно кажется ниже общей поверхности.

Шагреновую поверхность и рельеф зерен надо наблюдать без анализатора.

В курсах петрографической методики минералы разбиваются на ряд групп по показателю преломления на основании их рельефа и характера поверхности в шлифах.

Псевдоабсорбция. Все сказанное выше о шагреновой поверхности и рельефе относится, строго говоря, только к оптически изотропным телам. В двупреломляющих кристаллах картина должна несколько усложниться благодаря тому, что в каждом сечении в общем случае имеются два показателя преломления. При вращении столика рельеф и характер поверхности должны меняться. В тот момент, когда с направлением колебаний поляризатора совпадает одно из направлений колебаний в кристалле (n'_p или n'_g), через кристалл проходит только один луч. Рельеф и характер поверхности будут соответствовать показателю преломления кристалла для данного луча. Когда кристалл повернут относительно поляризатора, — проходят оба луча. Рельеф и характер поверхности должны иметь промежуточный характер.

Практически, однако, эти изменения рельефа в огромном большинстве случаев настолько слабо выражены, что даже для опытного глаза совершенно не заметны. Легко наблюдаются они в тех минералах, у которых двупреломление не слишком слабо и притом один из показателей преломления близок к показателю канадского бальзама.

При очень большом двупреломлении и близости одного из показателей к показателю канадского бальзама имеет место явление, которое Е. С. Федоров назвал псевдоабсорбцией. заключается оно в том, что при вращении столика микроскопа кристалл кажется то совершенно светлым, бесцветным и гладким (когда колебания совершаются в направлении, для которого показатель кристалла близок к показателю канадского бальзама), то серым или даже темно-серым с резким рельефом и шагреновой поверхностью. Внешне это явление напоминает плеохроизм, но по существу не имеет с ним ничего общего. Потемнение кристалла обусловлено здесь не более высокой абсорбцией для данного направления колебаний, а частичным рассеиванием света на неровностях поверхности кристалла, когда его показатель преломления значительно отличается от показателя канадского бальзама.

Псевдоабсорбция в шлифах хорошо заметна у кальцита ($n_o = 1,658$, $n_e = 1,486$) и доломита ($n_o = 1,681$, $n_e = 1,500$), в тех разрезах, в которых n'_e не слишком отличается от показателя канадского бальзама (1,54).

В иммерсионных препаратах изменение рельефа зерна при вращении столика, а в случае сильного двупреломления и псевдоабсорбция

наблюдаются всегда, когда показатель преломления иммерсионной среды близок к одному из показателей преломления кристалла.

Поглощение света тонкозернистыми агрегатами. К описанным явлениям примыкает поглощение света тонкозернистыми агрегатами. Такие агрегаты под микроскопом в проходящем свете кажутся темными, а иногда совершенно непрозрачными (черными), даже если они сложены из прозрачных и бесцветных частиц. Если в толщине препарата укладывается много таких частиц, то благодаря многократному отражению и преломлению на их границах, интенсивность проходящего света весьма ослабляется, чем и объясняется указанное явление. Примером могут служить некоторые глины, почти непрозрачные в петрографических шлифах нормальной толщины, тонкозернистые, особенно натечные карбонатные образования и многочисленные искусственные химические продукты.

§ 2. Полоска Бекке. Дисперсионный эффект

Явлением, называемым полоской Бекке, пользуются для того, чтобы определить, какой из двух лежащих рядом минералов в шлифе обладает более высоким показателем преломления. Это же явление позволяет сравнивать показатели преломления минералов с показателем канадского бальзама. О полоске Бекке подробно сказано в части настоящего руководства, посвященной иммерсионному методу (стр. 206).

Дисперсионный эффект (термин В. Н. Лодочникова) наблюдается на контакте двух бесцветных сред, мало отличающихся друг от друга по показателям преломления. Заключается он в том, что у контакта среда с меньшим показателем преломления кажется слегка окрашенной в золотисто-желтый, а среда с большим показателем преломления в бледный синевато-зеленый цвет. Окраски эти в петрографических шлифах очень слабы, и чтобы ими пользоваться на практике, нужно предварительно научиться их различать, наблюдая в шлифе контакт между кварцем и ортоклазом. Наблюдение ведут при среднем увеличении, слегка прикрыв диафрагму. Дисперсионный эффект позволяет легко различать ортоклаз, альбит и кварц при их совместном присутствии в шлифе.

Эффект этот обусловливается различным преломлением лучей разных длин волн при переходе из одной среды в другую. Чем больше сравниваемые среды различаются друг от друга по величине дисперсии показателей преломления, тем сильнее выражен этот эффект. В иммерсионных препаратах, если заполняющая препарат жидкость обладает большой дисперсией показателей, дисперсионный эффект выражен очень резко, даже при сравнительно большой разнице в показателях преломления минерала и жидкости.

Если показатели преломления двух сравниваемых сред очень близки друг к другу, то синеватая и желтоватая каемки при легком поднятии и опускании тубуса меняются местами — наблюдается явление цветных полосок Бекке.

Глава XII

ДИСПЕРСИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ
И ЕЕ НАБЛЮДЕНИЕ

§ 1. Дисперсия угла оптических осей

Дисперсия показателей преломления кристалла обуславливает собой не только дисперсию силы двупреломления, о которой говорилось выше, но и дисперсию угла оптических осей, т. е. разную величину угла оптических осей в кристалле для света разных длин волн. Из гл. IV, § 4 мы знаем, что положение круговых сечений, нормальными к которым являются оптические оси, определяется в двuosных кристаллах относительной величиной главных осей индикатрисы — n_g , n_m и n_p . Для света разных длин волн величины этих осей различны, и, следовательно, индикатриса для каждой длины волны имеет свою величину. Если форма всех этих индикатрис одна и та же, другими словами, если оси n_g , n_m и n_p , увеличиваясь или уменьшаясь, сохраняют отношение своих величин, то круговые сечения для света всех длин волн занимают одинаковое положение, и дисперсия угла оптических осей не имеет места. Почти всегда, однако, индикатрисы для света разных длин волн не вполне подобны друг другу, следствием чего является несколько различное положение круговых сечений и дисперсия оптических осей. У большинства минералов эта дисперсия выражена довольно слабо.

Дисперсией угла оптических осей обуславливается то обстоятельство, что двuosный кристалл в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, в скрещенных николях не является темным, а имеет низкую (сероватую) окраску, сохраняемую при вращении столика. Причина этого явления в том, что разрез перпендикулярен оптической оси только для какого-либо одного определенного цвета, который и погасает, лучи же других цветов проходят с малой разностью хода и дают серую интерференционную окраску.¹ Явление это при одной и той же величине дисперсии выражено тем резче, чем больше сила двупреломления и толщина кристалла. При сильной дисперсии в этом разрезе видны своеобразные фиолетово-лиловые тона, меняющиеся при вращении столика.

Различают два вида дисперсии угла оптических осей; 1. Угол оптических осей для более длинных волн (красных) больше, чем для коротких (фиолетовых). Этот вид дисперсии обозначается $r > v$ (r — rouge, rot — красный; v — violet, violett — фиолетовый) или $\rho > \nu$ (ρ — $\rho\acute{o}\delta\epsilon\omicron\varsigma$ — родеос, розовый, ν — $\delta\alpha\kappa\iota\nu\delta\iota\nu\omicron\varsigma$ — гиакиндинос, фиолетовый).

2. Угол оптических осей для длинных волн меньше, чем для коротких. Обозначается $r < v$ или $\rho < \nu$.

¹ Отсутствие погасания в разрезе, перпендикулярном к оптической оси может быть обусловлено также конической рефракцией (гл. I, § 5).

Распознаются эти два вида дисперсии в сходящемся свете, в разрезах с выходом оптической оси в поле зрения, т. е. в разрезах, при-

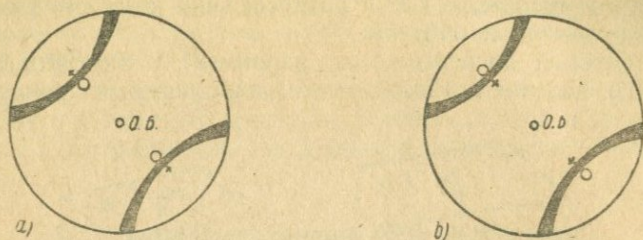


Рис. 115. Распределение окраски в случае дисперсии угла оптических осей: \times — выход оптической оси для красных лучей (синеватая окраска), o — выход оптической оси для синих лучей (красноватая окраска); а) $r > v$, б) $r < v$.

близительно перпендикулярных к оптической оси или острой биссектрисе. Расположим плоскость оптических осей под 45° к нитям (рис. 115). Если кристалл обладает дисперсией $r > v$, то около вершин гиперболы на вогнутой стороне будет наблюдаться слабое синеватое, а на выпуклой — слабое красноватое окрашивание (рис. 115, а). Причина этого в том, что оптические оси для разных лучей в данном случае не лежат в одной точке — вершине темной ветви гиперболы. Оптические оси для красных лучей, делающие больший угол с острой биссектрисой, лежат дальше от нее — на вогнутой стороне ветви гиперболы. В этой точке разность хода для красных лучей равна нулю, и они гаснут. Почти равна нулю она также для соседних с красными желтых и зеленых лучей. Проходят только синие и фиолетовые лучи, которые и дают наблюдаемую окраску. Аналогично, на выпуклой стороне ветви гиперболы, ближе к острой биссектрисе, где выходит оптическая ось для фиолетовых лучей, погашены фиолетовые и смежные с ними лучи

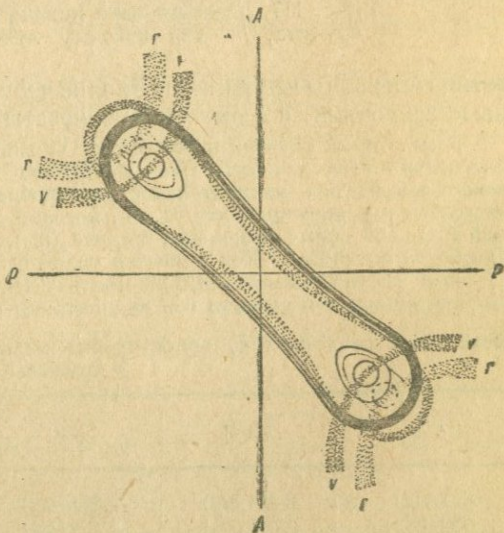


Рис. 116. Сильная дисперсия угла оптических осей $r > v$: r — гипербола, темная для красных лучей (синеватая); v — гипербола, темная для синих лучей (красноватая).

спектра. Наблюдаемая здесь окраска образуется главным образом за счет красных и оранжевых лучей.

В случае дисперсии $r < v$ распределение этих окрасок должно быть обратное (рис. 115, б).

При сильной дисперсии, как, например, у титаниита ($2E_r = 51^\circ$; $2E_v = 40^\circ$), явление это выражено весьма резко, и кроме того, сами

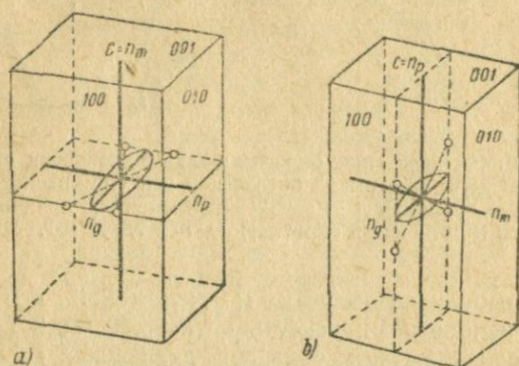


Рис. 117. Ориентировка индикатрицы в кристаллах брукита: а) — для красных лучей; б) — для синих.

ветви гиперболы не являются вполне черными, а имеют с одной стороны красноватый, а с другой — синеватый оттенок (рис. 116).

В некоторых случаях в результате сильной дисперсии меняется положение плоскости оптических осей. Так, у брукита (TiO_2 , ромб. сингл., оптически положительный) оси индикатрицы с уменьшением длины волны увеличиваются настолько неравномерно, что та ось, которая для красных лучей была наименьшей (n_p), для синих становится средней (n_m), соответственно с этим положение плоскости оптических осей меняется на перпендикулярное (рис. 117).

Для средней желто-зеленой части спектра ($\lambda = 555 \text{ м}\mu$) брукит одноосен, так как меньшая и средняя оси индикатрицы равны друг другу.

Показатели преломления, ориентировка индикатрицы и угол оптических осей у брукита

$\lambda, \text{ м}\mu$	$\parallel [100]$	$\parallel [001]$	$\parallel [010]$	$2E$	Плоскость оптических осей
671 (Li)	2,664 (n_g)	2,551 (n_m)	2,543 (n_p)	55°	(001)
589 (Na)	2,741 (n_g)	2,583 (n_m)	2,584 (n_p)	30	(001)
555	n^2	$n_m = n_p$	$n_m = n_p$	0	—
535 (Ti)	2,827 (n_g)	2,631 (n_p)	2,683 (n_m)	34	(010)

В сходящемся свете, в разрезе, перпендикулярном к О. Б., брукит даст сложную картину расположенных накрест друг к другу гипербол, окрашенных в яркие зеленые и желтые цвета. Аналогичные явления имеют место у кристаллов гетита ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

В иммерсионных препаратах дисперсия угла оптических осей обычно лучше заметна, чем в шлифах (вследствие большей толщины зерен).

При полном отсутствии дисперсии угла оптических осей в кристалле теоретически должна наблюдаться очень слабая кажущаяся дисперсия $\gamma < \nu$, зависящая исключительно от дисперсии показателей преломления. В прозрачных кристаллах $n_{кр.} < n_{сн.}$. Поэтому, при $2V_{кр.} = 2V_{сн.}$, $2E_{кр.} < 2E_{сн.}$ (стр. 121) и $\gamma < \nu$, явление это выражено очень слабо и обычно маскируется настоящей дисперсией угла оптических осей.

В чистом виде дисперсия угла оптических осей имеет место только в кристаллах ромбической сингонии. В моноклинных и триклинных кристаллах на эту дисперсию накладывается дисперсия главных осей индикатрисы.

§ 2. Дисперсия главных осей индикатрисы

Заключается эта дисперсия в том, что оси индикатрисы для волн разной длины занимают различное положение в кристалле. В кристаллах средних сингоний и ромбической сингонии эта дисперсия невозможна, так как здесь оси индикатрисы связаны с элементами симметрии кристалла и занимают строго определенное положение.

В моноклинных кристаллах одна ось индикатрисы, совпадающая с осью G_2 или с нормалью к плоскости симметрии, занимает одинаковое положение для всех лучей, две другие оси могут диспергировать. В триклинной сингонии возможна дисперсия всех трех осей индикатрисы.

Резко выраженная дисперсия осей индикатрисы проявляется в полном погасании кристалла при вращении столика микроскопа между скрещенными николями. Погасание не наступает одновременно для всех лучей. В тот момент, когда направления колебаний, например, для красных лучей совпадают с нитями, направления колебаний для синих лучей образуют с ними некоторый угол, и кристалл имеет синеватую окраску. Если, наоборот, погасить синие лучи, совместив направления их колебаний с нитями, кристалл приобретает красноватую окраску. Полное погасание такого кристалла может наблюдаться только в монохроматическом свете, причем углы погасания для света разных длин волн различны.

Если дисперсия осей индикатрисы не столь сильна, погасание имеет место, но, приближаясь к положению погасания и темнея, кристалл меняет оттенок своей интерференционной окраски, становясь по одну сторону погасания синеватым, а по другую — красноватым.

В большинстве случаев такой характер погасания, как свидетельствующий о наличии дисперсии осей индикатрисы, служит доказательством принадлежности кристалла к моноклинной или триклинной сингонии. Надо иметь, однако, в виду, что подобные явления могут наблюдаться также в ромбических кристаллах, обладающих сильной дисперсией оптических осей, в разрезах, близких к перпендикулярности к оптической оси (в сходящемся свете — оптическая ось в поле зрения). В таком разрезе построенные согласно теореме Френеля направления колебаний для синих и красных лучей образуют между собой некоторый угол.

§ 3. Наблюдение дисперсии главных осей индикатрисы в сходящемся свете

В моноклинных кристаллах, наблюдая в сходящемся свете разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе, можно установить, какая ось индикатрисы совпадает с осью симметрии (или с нормалью к плоскости симметрии) кристалла. Здесь возможны три случая:

1. С G_2 кристалла совпадает ось n_m — наклонная дисперсия. Диспергируют острая и тупая биссектрисы. В разрезе, который

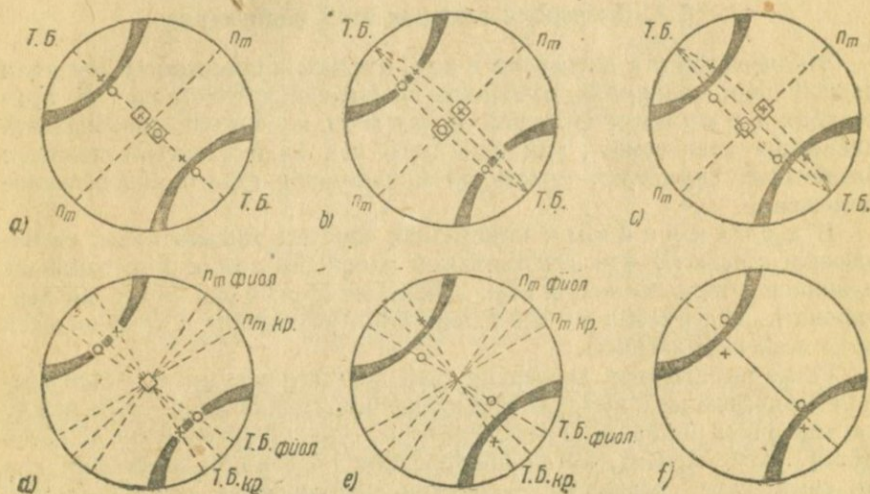


Рис. 118. Дисперсия осей индикатрисы. Картина в сходящемся свете в разрезе, перпендикулярном к О. Б.: а) — наклонная дисперсия; б) — горизонтальная дисперсия; в) — горизонтальная дисперсия с одновременной дисперсией $r > v$; д) — перекрещенная дисперсия; е) — перекрещенная дисперсия с одновременной дисперсией $r > v$, ф) асимметричная дисперсия (триклинная сингония).

Обозначения: крестик в квадрате — острая биссектриса для красных лучей; кружок в квадрате — то же для фиолетовых лучей; X — оптическая ось для красных лучей (синеватая окраска); о — то же для синих лучей (красноватая окраска).

перпендикулярен к О. Б. для лучей средней части спектра, острые биссектрисы для крайних лучей спектра будут несколько смещены в плоскости О. Б. — Т. Б. Это будет сказываться на положении оптических осей. У выхода одной оптической оси должна наблюдаться дисперсия $r > v$, у выхода другой — $r < v$ (рис. 118, а). (Сильную наклонную дисперсию обнаруживают некоторые эпидоты.) Если кристалл обладает одновременно и дисперсией угла оптических осей и наклонной дисперсией, то в результате дисперсия для одной оптической оси усиливается, а для другой ослабляется. Например, один из авгитов имеет дисперсию оптических осей $r > v$, причем $2V_{кр.} - 2V_{фиол.} = 2^\circ 22'$, т. е. каждая из оптических осей диспергирует в пределах $1^\circ 11'$. Этот же авгит обладает наклонной дисперсией в пределах $1^\circ 7'$. В резуль-

тате действия обеих дисперсий одна оптическая ось диспергирует в пределах $2^{\circ}18'$, а другая почти не диспергирует ($0^{\circ}4'$).

2. CG_2 кристалла совпадает тупая биссектриса — горизонтальная дисперсия. Дисперсия совершается в плоскости О. Б.— n_m . Плоскости оптических осей для разных лучей будут наклонены друг к другу, как показано на рис. 118, б. При наложении на эту дисперсию дисперсии оптических осей, последние испытывают дополнительное смещение (рис. 118, в). Пример горизонтальной дисперсии с одновременной дисперсией $r > v$ дает адуляр.

3. CG_2 кристалла совпадает острая биссектриса, которая, следовательно, не диспергирует; дисперсию обнаруживают оси n_m и Т. Б.—перекрещенная дисперсия. Расположение оптических осей показано на рис. 118, д. При одновременной дисперсии $r > v$ — на рис. 118, е (последнюю картину дает бура).

В кристаллах триклинной сингонии, где диспергируют одновременно все оси индикатрисы, накладываются друг на друга все три вида дисперсии моноклинных кристаллов и дисперсия угла оптических осей. Получается асимметричная дисперсия (рис. 118, ф). Примером служит хромовокислый калий.

Все описанные здесь дисперсии для большинства веществ могут быть наблюдаемы только в шлифах значительно более толстых, чем обычные петрографические (0,5 мм и толще).

Исследование дисперсии в сходящемся свете сыграло большую роль при изучении оптических свойств минералов во второй половине XIX века, когда по виду дисперсии определялась сингония и ориентировка индикатрисы в кристаллах. В настоящее время для определения этих свойств обычно прибегают к универсальному методу Федорова, позволяющему непосредственно находить ориентировку индикатрисы в кристалле.

Глава XIII

ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Если вдоль оптической оси кристалла пропускать световой луч, то в общем случае, как известно, этот луч пройдет без изменений, как сквозь изотропное тело, и в скрещенных николях кристалл должен быть темным. Однако некоторые кристаллы в этих условиях кажутся освещенными, причем это освещение не исчезает и не меняется при вращении столика микроскопа.

Явление это наблюдается в кристаллах, обладающих свойством вращать плоскость поляризации. Такие кристаллы, когда через них параллельно оптической оси проходит поляризованный луч, поворачивают направление его колебаний на некоторый угол α . Этот угол зависит от вещества кристалла и длины волн применяемого света и пропорционален толщине кристалла.

а следовательно и симметрией. Поскольку индикатриса для этих кристаллов — шар, все разрезы их оптически равнозначны и одинаково сильно вращают плоскость поляризации.

В кристаллах средних сингоний вращение плоскости поляризации можно наблюдать, когда луч идет по оптической оси и, следовательно, не испытывает двупреломления. В других разрезах оно маскируется явлениями двупреломления.

В кристаллах низших сингоний вращение плоскости поляризации также имеет место, причем оно обнаруживается вдоль обеих оптических осей. Однако здесь на это явление накладывается ряд других явлений, вследствие чего наблюдать его здесь значительно труднее, чем в кристаллах средних сингоний.

Угол вращения при неизменных прочих условиях прямо пропорционален толщине кристалла. Удельным вращением называется угол, на который поворачивается плоскость поляризации луча, прошедшего в кристалле путь, равный 1 мм.

Удельное вращение кристаллов одного и того же вещества различно для света разных длин волн; оно возрастает с уменьшением длины волны. Так, например, удельное вращение кварца для света разных длин волн имеет следующие значения:

Линия спектра и длина волны в μ	B: 687	C: 656	D: 589	E: 527	F: 486	G: 431	H: 397
Удельное вращение кварца	15,75°	17,31°	21,71°	27,54°	32,76°	42,59°	51,19°

Из этой таблички, между прочим, видно, что удельное вращение кварца для средней части спектра составляет 20—30°. При толщине петрографического шлифа, равной 0,02—0,03 мм, вращение составит всего 1°, что практически не даст заметного эффекта. Для большинства оптически активных (т. е. вращающих плоскость поляризации) кристаллов эта величина еще меньше. Из минералов сильным вращением, сказывающимся и в петрографических шлифах, обладает киноварь (HgS), удельное вращение кристаллов которой примерно в 15 раз выше, чем кварца.

В белом свете в скрещенных николях оптически активные кристаллы кажутся окрашенными. При вращении анализатора эта окраска меняется, так как анализатор поочередно гасит лучи разных длин волн, направления колебания которых повернуты на разные углы.

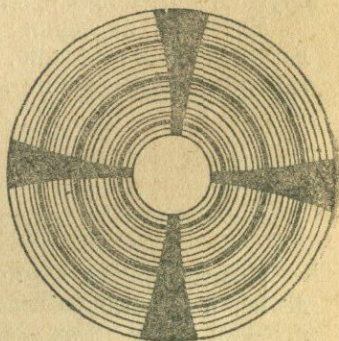


Рис. 121. Коноскопическая фигура оптически-активного одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси.

Измерение удельного вращения производят в специальных толстых препаратах в монохроматическом свете. Направление вращения может быть определено в белом свете при вращении анализатора по последовательности смены окрасок на кристалле.

В сходящемся свете в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, оптически-активные одноосные кристаллы дают фигуру, изображенную

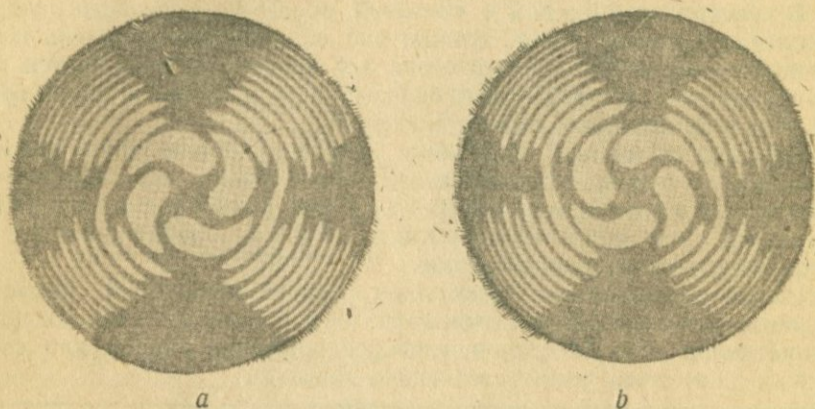


Рис. 122. Спирали Эри: *a* — нижняя пластинка левовращающая; *b* — нижняя пластинка правовращающая.

на рис. 121. Если наложить друг на друга две пластинки равной толщины, изготовленные из правого и левого кристаллов одного и того же вещества, в сходящемся свете получают своеобразные фигуры (спирали Эри), изображенные на рис. 122, *a* и *b*. Фигура *a* соответствует случаю, когда внизу лежит левовращающая пластинка; фигура *b* — случаю, когда нижняя пластинка правовращающая.

Методика изучения вращательной способности кристаллов не излагается нами детально, так как она не находит применения при оптическом исследовании микроскопических кристаллов.¹

Глава XIV

ОПТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ

Иногда кристаллы кубической сингонии обнаруживают двупреломление, а кристаллы средних сингоний оказываются двуосными. Эти явления носят название оптических аномалий.

Брюстер в 1816 г. открыл, что если изотропное тело подвергать одностороннему сжатию или растяжению, в нем появляется двупреломление.

¹ Подробности см. П. Грот, Физическая кристаллография, стр. 153—161; 712—714.

Опыт Брюстера можно воспроизвести следующим образом. Предметное стекло (лучше полоску стекла шириной в 1 см) поставим вертикально на столик микроскопа так, чтобы длинное ребро проходило под 45° к направлениям колебаний николей. В скрещенных николях, конечно, стекло будет темным. Теперь, придерживая стеклянную пластинку за концы руками, слегка надавим на ее середину большими пальцами обеих рук. Пластинка при этом изогнется (изгиб настолько слаб, что на глаз не заметен). Одна часть изогнутой пластинки испытывает сжатие, другая — растяжение, посередине же проходит нейтральная зона, не испытывающая ни сжатия, ни растяжения. Эта нейтральная зона останется темной в скрещенных николях, а сжатая и растянутая зоны приобретут интерференционную окраску. Введя гипсовую пластинку, обнаруживаем, что знаки удлинения этих зон противоположны (рис. 123).

В одноосных кристаллах сила, действующая перпендикулярно к оптической оси, превращает круговое сечение индикатрисы в эллиптическое, вследствие чего появляется аномальная двуосность. Достаточно самой незначительной деформации кругового сечения, чтобы угол оптических осей приобрел заметную величину (особенно в кристаллах со слабым двупреломлением). Поэтому можно думать, что если бы методы, позволяющие констатировать двуосность, были более чувствительными, то большинство одноосных кристаллов давало бы небольшой, а слабодвупреломляющие — и довольно значительный угол оптических осей. Индикатриса двуосных кристаллов также меняет свою форму при наличии механических напряжений; однако здесь, чтобы обнаружить эффект, необходимы количественные измерения.

Обычно при устранении деформирующей силы вызванные ею аномалии исчезают. Однако если сила достаточно велика, то в отдельных частях решетки кристалла остаются нарушения и напряжения, обуславливающие наличие аномалий. Этим объясняется, например, двупреломление в кристаллах каменной соли, приуроченное к плоскостям скольжения и исчезающее после продолжительного отжига кристалла. Хорошо известные фигуры удара на тонких пластинках каменной соли (получающиеся, если на пластинку поставить иглу и ударить по ней молоточком) оказываются двупреломляющими по той же причине.

Разного рода включения в оптически изотропных кристаллах также вызывают напряжения, которые могут привести к возникновению аномального двупреломления.

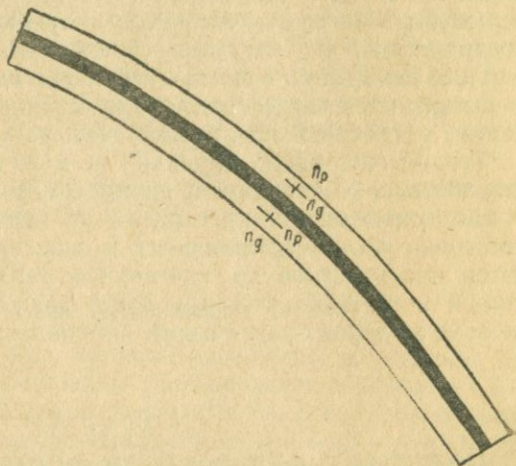


Рис. 123. Ориентировка осей n_g и n_p в изогнутой стеклянной пластинке.

К этой категории оптически аномальных кристаллов примыкает другая, в которой аномалии обуславливаются напряжениями, причина которых лежит в самой решетке кристаллов. Сюда относятся квасцы, некоторые гранаты, турмалин (аномально-двуосный) и др. Эти кристаллы представляют собой изоморфные смеси. Напряжения в них возникают вследствие замены в решетке части ионов другими, отличающимися от первых по объему.

Наконец, возможны случаи, когда кристалл, по внешней форме обладающий высокой симметрией, в действительности состоит из множества неделимых более низкой симметрии, которые обнаруживают свойственное им двупреломление (такие случаи, строго говоря, не следовало бы относить к категории оптических аномалий). Для многих таких кристаллов установлено, что при повышении температуры они переходят в более высокосимметричную модификацию. Это позволяет предполагать, что кристалл образовался при высокой температуре, а при ее понижении в связи с переходом одной модификации в другую он превратился в агрегат мелких кристалликов, относящихся к модификации, устойчивой при низкой температуре.

Теория оптических аномалий не может еще считаться достаточно разработанной. Аномальное двупреломление обычно легко отличается в микроскопических препаратах от нормального. Аномалии первой категории обычно проявляются в виде отдельных двупреломляющих пятен или участков на изотропном зерне. Аномальные кристаллы второй и третьей категории часто дают в скрещенных николях несколько секторов с различными направлениями колебаний.

Глава XV

ПОНЯТИЕ О ФЕДОРОВСКОМ (УНИВЕРСАЛЬНОМ) МЕТОДЕ

§ 1. Принцип метода

Изложенные выше методы исследования оптических свойств кристаллов разработаны применительно к поляризационному микроскопу со столиком, вращающимся вокруг одной оси — оси микроскопа.

Великий русский ученый Е. С. Федоров в конце девятнадцатого века разработал принципиально новый метод, названный им универсальным или теодолитным методом. Исследование кристаллов этим методом производится на особом универсальном (федоровском) столике, который привинчивается на обычный столик поляризационного микроскопа. Федоровский столик имеет несколько осей, позволяющих выводить препарат из положения перпендикулярного к оси микроскопа и вращать его вокруг различных направлений в пространстве. В первом варианте федоровский столик имел две таких оси, затем — три. В настоящее время всеобщим распространением пользуется столик с четырьмя осями, применительно к которому Федоровым и его учениками и была детально разработана методика исследования кристаллов.

Ход исследования на федоровском столике заключается в том, что каждое кристаллографическое и каждое кристаллооптическое направление исследуемого зерна последовательно устанавливается параллельно горизонтальной нити окулярного креста. Одновременно плоскость перпендикулярная к этому направлению оказывается совмещенной с плоскостью симметрии микроскопа. Отсчеты по лимбам столика в момент совмещения дают нам координаты этих направлений и плоскостей в пространстве. Изобразив результаты измерений в стереографической проекции, можно измерить на проекции углы, которые образуют оси индикатрисы с кристаллографическими направлениями. При этом часто однозначно устанавливается сингония кристалла. По ходу исследования измеряется угол оптических осей и определяется знак кристалла. Можно приблизительно (до нескольких сотых) определить его показатель преломления и охарактеризовать ряд других свойств. Особенно ценные данные получаются при изучении на федоровском столике двойниковых образований. Всемирное распространение имеет федоровская методика определения полевых шпатов, позволяющая с большой точностью определять состав минерала.

Ниже мы даем элементы некоторых определений на федоровском столике. Специальные руководства по федоровскому методу указаны в конце главы.

§ 2. Четырехосный федоровский столик

Основанием столика служит плоское металлическое кольцо A (рис. 124), на котором монтированы две вертикальные стойки C, C , заканчивающиеся цапфами. В цапфы вставлена ось I , несущая кольцо B . На одном конце оси имеется вертикальный лимб i и рукоятка f для вращения кольца B вокруг этой оси. На стойке, около вертикального лимба, укреплен нониус i_1 для отсчета углов поворота и винт для зажима оси. В кольцо B , вращающееся вокруг оси I , вставлено кольцо m , которое может в нем свободно вращаться в своей плоскости. Ось вращения этого кольца называется осью M . Кольцо m по внешней окружности разделено на 360° . Снаружи круга B , около второй стойки имеется нониус m_1 для отсчета углов поворота вокруг оси M . Вращение кольца m может закрепляться винтом l , который помещается в центре рукоятки оси I . Кольцо m несет на себе две цапфы H, H , расположенные против делений 0° и 180° лимба m . В эти цапфы вставлена ось N , несущая на себе кольцо P . Углы наклона кольца P вокруг оси N измеряются по двум круговым дужкам h, h . Дужки привинчены к кольцу m против делений 90° и 270° , на шарнирах, которые позволяют по минованию надобности опускать эти дужки. Кольцо P при наклоне вокруг оси N может быть закреплено в любом положении при помощи винта g , имеющегося на одной из цапф этой оси.

Внутри кольца P в его плоскости свободно вращается металлическое кольцо n , в которое вставлен стеклянный диск. На этот диск и кладется исследуемый препарат. Нормаль к кольцу n называется

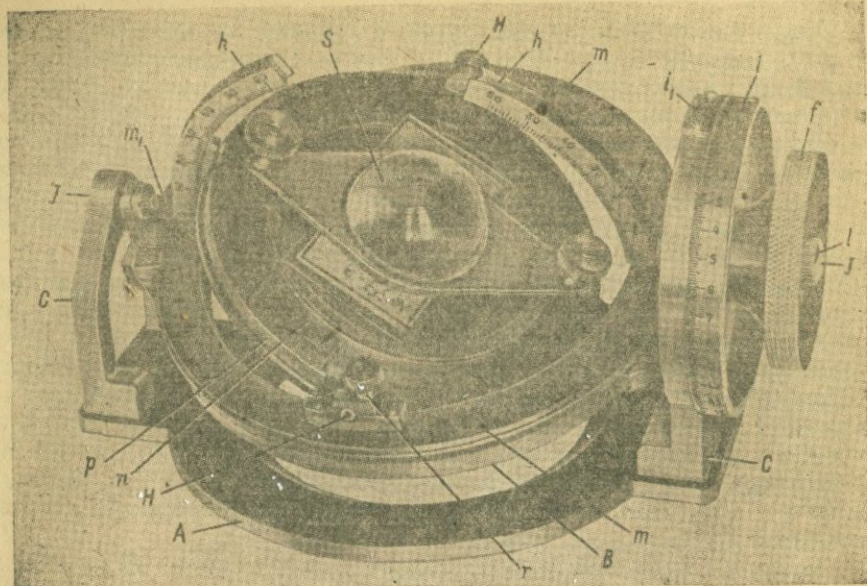


Рис. 124. Четырехосный федоровский столик. *A* — основание столика; *C, C* — стойки; *I* — ось *I*; *i* — лимб; *i*₁ — нониус для отсчета поворотов вокруг оси *I*; *f* — рукоятка оси *I*; *B* — кольцо *B*; *m, m* — кольцо *m* с лимбом; *m*₁ — нониус для отсчета поворотов вокруг оси *M*; *l* — винт для закрепления кольца *m*; *H, H* — цапфы оси *H*; *h, h* — дужки с делениями для отсчета поворотов вокруг оси *H*; *P* — кольцо *P*; *r* — винт для закрепления кольца *P* в наклонном положении; *n* — кольцо *n*; *S* — верхний сегмент.

осью *N*. Эта ось при всех положениях столика нормальна к плоскости препарата. Для замера углов поворота вокруг оси *N* внутренняя окружность кольца *P* разделена на 360°, а на кольце *n* имеется указательная черточка.

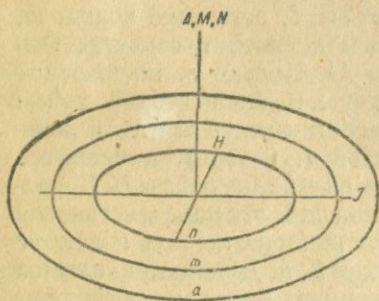


Рис. 125. Схема осей федоровского столика в исходном положении: *A* (ось столика микроскопа); *M* и *N* совпадают с осью микроскопа; *I* параллельна горизонтальной нити; *H* — параллельна вертикальной нити окулярного креста.

Таким образом, препарат, монтированный на федоровском столике, имеет четыре вращения вокруг осей столика и, кроме того, вместе со всем столиком пятое вращение — вокруг оси столика микроскопа (ось *A*). Расположение этих осей схематически показано на рис. 125.

Некоторые другие детали прибора будут упомянуты ниже.

§ 3. Установка и регулировка федоровского столика

Приступая в работе, проверяют центровку объектива, которым предполагается пользоваться, после чего из столика микроскопа вынимают

его внутреннюю часть («конфорку»), препятствующую большим наклонам вокруг оси I . Федоровский столик укрепляют на столике микроскопа при помощи двух винтов, которые свободно входят в отверстия плоского металлического кольца A . В столике микроскопа имеются для этих винтов отверстия с винтовой нарезкой.

Федоровский столик центрируют относительно вращения вокруг оси N . Для этого кладут на столик шлиф i и, заметив точку в центре, поворачивают круг n на 180° . Если точка при этом отойдет, ее приближают на половину расстояния к центру движением препарата, а затем совмещают с центром, двигая весь федоровский столик по столику микроскопа. Винты, прикрепляющие федоровский столик, должны при этом быть несколько ослаблены. Их закрепляют по окончании центрировки. Если отверстия для винтов в кольце A не имеют люфта, нужного для проведения центрировки указанным способом, то центрируют обычными приемами, используя центрировочные винты объектива. При этом будет несколько нарушена центрировка самого столика микроскопа, что обычно несущественно при небольших увеличениях, употребляемых при федоровском методе. Для вращения вокруг оси M центрировка не производится. Конструкцией столика предусмотрено совпадение центров колец m и n . Если же этого нет, то нельзя центрировать кольцо m , сохраняя в то же время центрировку кольца n .

Положение столика будем называть исходным, когда:

1. Ось I расположена параллельно горизонтальной нити окулярного креста, а лимб i находится справа от наблюдателя.

2. Ось N расположена параллельно вертикальной нити окулярного креста.

3. Оси M и N расположены вертикально (по оптической оси микроскопа).

Для установки оси I в исходное положение вращают федоровский столик вокруг I до вертикального положения кольца B , подняв предварительно тубус микроскопа и удалив объектив. Обычно приходится также несколько опустить осветительный аппарат. Вводят линзу Бертрана, которая играет роль длиннофокусного объектива и фокусируют ее на верхний край кольца B . Вращением вокруг оси I и вокруг оси столика микроскопа совмещают верхний край кольца B с горизонтальной нитью окулярного креста. Отсчет по лимбу столика микроскопа в этот момент записывается, как отвечающий исходному положению оси I .

Приведем ось N в исходное положение. Установив ось I в ее исходное положение, располагаем круг B приблизительно горизонтально: отсчет по лимбу i около 0° . Поворотом вокруг оси N ставим кольцо P вертикально. Отфокусировав микроскоп на ребро кольца P , освобождаем винт l , закрепляющий вращение кольца m . Вращением вокруг оси M ставим ребро кольца P параллельно вертикальной нити. Если при этом окажется, что нониус m_1 дает отсчет по лимбу m , точно или приблизительно равный 270° , то кольцо m

поворачивают на 180° , чтобы отсчет по лимбу m был точно или приблизительно равен 90° . На правильно изготовленном столике исходному положению оси H отвечает отсчет 90° на лимбе m . Если этот отсчет отличается от 90° , его значение определяется для данного столика раз навсегда и записывается. Установив ось H в исходное положение, прочно закрепляют винтом I кольцо m .¹ При таком положении кольца m нуль лимба на кольце P обращен к наблюдателю. Дужки h, h , служащие для замера углов наклона вокруг H , также обращены к наблюдателю.

Определение места нуля лимба i . Горизонтальному положению столика должен отвечать отсчет 0° по нониусу i_1 . Для проверки совмещаем поворотом столика вокруг оси I центр конца оси H с крестом нитей. Если нуль лимба i находится точно на своем месте, то нониус i_1 должен при этом давать отсчет 90 или 270° ; смотря по тому, в какую сторону был произведен поворот. Если этот отсчет отличается от 90 или 270° , то поправка на место нуля находится как разность между этим отсчетом и 90 или 270° . Например, если отсчет равен 91 или 271° , то нулевое положение лимба будет 1° и из значения каждого измеренного угла придется вычитать один градус. Если отсчет равен 88° или 268° , то место нуля будет 358° и к измеренным величинам углов придется добавлять два градуса.

Поправка на место нуля определяется дважды: при повороте в одну и в другую сторону и записывается.

§ 4. Монтировка препарата на федоровском столике. Стекло- стеклянные сегменты

Препарат (шлиф) кладется на стеклянный диск, вставленный в кольцо n . Предварительно на стеклянный диск помещается капля глицерина. На шлиф помещается еще капля глицерина и накладывается стеклянный шаровой сегмент S , который привинчивается при помощи имеющихся в его металлической оправе винтов к кольцу n . Под шлиф помещается еще один сегмент, который в зависимости от конструкции столика или просто приклеивается каплей глицерина к стеклянному диску или, кроме того, прижимается двумя пружинами.

Верхний сегмент представляет собой почти полное полушарие. Нижний — несколько меньше половины шара, с таким расчетом, чтобы оба сегмента плюс толщина стеклянного диска, предметного и покровного стекла препарата образовали шар, в центре которого находится исследуемое зерно. Воздушные промежутки в этом шаре заменены тонкими прослойками глицерина. Получается оптически почти однородная система, через которую свет проходит, не изменяя своего направления при любом наклоне шлифа относительно оси микроскопа. Это справедливо, однако, лишь при условии, что показатель преломления исследуемого зерна приблизительно равен показателю преломле-

¹ Вращением вокруг оси M пользуются редко. Почти все время кольцо m должно оставаться закрепленным на делении, отвечающем исходному положению оси H .

ния стекла сегментов. Поэтому столики обычно снабжены несколькими парами сегментов различных показателей преломления. Если показатель преломления стекла сегментов значительно отличается от показателя преломления минерала, то во все замеры углов наклона вокруг осей I и H приходится вводить поправки. Если обозначим замеренный угол через α , истинный угол между лучом и нормалью к шлифу в минерале — через β , показатели преломления минерала и стекла сегментов соответственно — $n_{\text{мин.}}$ и $n_{\text{сегм.}}$, то истинное значение угла находится по формуле

$$\sin \beta = \frac{n_{\text{сегм.}}}{n_{\text{мин.}}} \cdot \sin \alpha.$$

Показатели преломления достаточно брать с точностью до 0,05. В специальных руководствах по федоровскому методу приводится диаграмма для графического нахождения углов β .

Срез нижнего сегмента рассчитан на толщину предметного стекла около 1 мм. Если эта толщина значительно превышает 1 мм, исследуемое зерно оказывается выше центра нижнего полушария и ход лучей несколько нарушается. Происходящая отсюда погрешность тем меньше, чем больше радиус сегментов. При радиусе сегментов, равном 10 мм, и толщине предметного стекла — 2 мм, погрешность при наклоне шлифа на 30° составляет $1^\circ 35'$, при наклоне на 60° — $2^\circ 45'$. Если радиус сегментов равен 5 мм, то погрешность соответственно равна $3^\circ 10'$ и $5^\circ 35'$. Поэтому для работы федоровским методом надо готовить шлифы на стеклах по возможности близких по толщине к одному миллиметру и предпочтительно употреблять сегменты большего радиуса.

Поместив на столик препарат и прикрепив сегменты, следует убедиться в правильности положения препарата относительно осей H и I . Точка пересечения этих осей должна лежать в плоскости шлифа, следовательно зерно, находящееся на пересечении нитей, не должно смещаться при наклонах вокруг H и I . В современных моделях федоровского столика внутренняя часть кольца n может несколько подниматься и опускаться вращением на винтовой нарезке. Это позволяет отрегулировать зерно по высоте, если при поворотах вокруг H и I оно смещается с центра. Следует иметь в виду, что если зерно находится выше пересечения осей, оно при наклонах должно смещаться в сторону поворота, но кажущееся перемещение будет обратным, так как микроскоп дает перевернутое изображение. Если зерно лежит ниже пересечения осей, то по той же причине кажущееся смещение зерна будет в сторону поворота. Перед вращением внутренней части кольца n надо несколько освободить винты верхнего сегмента, а потом снова их закреплять.

§ 5. Определение координат плоскостей спайности, граней и двойникового шва

Координаты плоскостей спайности, как и других плоскостей кристалла, отсчитываются по лимбам осей H и N после того, как измеряемая плоскость совмещена с плоскостью симметрии микроскопа. Для

этого, удалив анализатор, ставят черту спайности вращением вокруг оси N параллельно вертикальной нити окулярного креста. Затем, наклоняя препарат в ту и другую сторону вокруг оси H , находят положение, когда черта кажется наиболее узкой, что имеет место, когда плоскость спайности расположена вертикально. Для проверки убеждаются, что при поднимании тубуса микроскопа полоска Бекке с обеих сторон черты спайности имеет одинаковую интенсивность. Ошибка в величине наклона вокруг H может достигать нескольких градусов. Для повышения точности установки надо применять возможно более сильные объективы и окуляры.

Результаты записываются примерно так: $n = 283^\circ$; $h = \overline{18^\circ}$. Стрелка показывает, что поднят правый конец круга n и отсчет h сделан по правой дужке. Если приходится вводить поправку в углы наклона вследствие разницы показателей преломления кристалла и стекла сегментов, то рядом ставится исправленное значение угла h .

Координаты граней находятся аналогично. Координаты плоскости срастания (двойникового шва) определяются таким же образом, но при вдвинутом анализаторе, без чего эта плоскость не будет заметна.

§ 6. Нахождение и определение главных осей и плоскостей индикатрисы

Нахождение первой плоскости индикатрисы. Главные плоскости индикатрисы нельзя видеть непосредственно, подобно, например, граням кристалла. О совмещении одной из главных плоскостей индикатрисы с плоскостью симметрии микроскопа судят по оптическим явлениям в кристалле. Это совмещение достигается путем постепенного приближения с помощью следующих операций.

Поставив столик в исходное положение, вращаем кольцо n вокруг оси N до погасания исследуемого зерна, а затем, поворачивая вокруг оси I , наблюдаем, сохраняется ли темнота. Если этого нет, наклоняем препарат вокруг I до максимального просветления зерна, а затем наклоном в ту или другую сторону вокруг H снова добиваемся его погасания.

Затем наклоняем столик вокруг оси I в противоположную сторону до наибольшего просветления и опять ставим зерно на погасание вращением на этот раз вокруг N .

Снова наклоняем столик вокруг оси I в обратную сторону до наибольшего просветления зерна и ставим его на погасание наклоном вокруг оси H и т. д.

Эти две операции повторяем поочередно до тех пор, пока изучаемый разрез не будет при вращении вокруг оси I все время оставаться темным.

Это произойдет тогда, когда одна из главных плоскостей индикатрисы совпадет с плоскостью симметрии микроскопа, а перпендикулярная к ней ось индикатрисы — с осью I . Погасание будет

сохраняться потому, что данная ось все время будет оставаться параллельной главному сечению одного из николей.

Координаты найденной плоскости записываются так же, как указано выше для плоскости спайности.

Определение найденной плоскости индикатрисы. Теперь следует выяснить, какая именно из плоскостей индикатрисы нами найдена, т. е. определить наименование перпендикулярной к этой плоскости оси индикатрисы, совпадающей с осью I . Для этого поворачиваем столик микроскопа на 45° (обычно против часовой стрелки). При этом ось I займет диагональное положение относительно главных сечений николей микроскопа. Затем вращаем препарат вокруг оси I . При этом вращении найденная ось эллипсоида все время совпадает с осью I , а две другие вращаются в перпендикулярной к ней плоскости.

Здесь возможны два случая: 1-й случай. Интерференционная окраска зерна при вращении вокруг I понижается и в некоторый момент произойдет погасание. Это будет тогда, когда одна из оптических осей кристалла совпадет с осью микроскопа. Если теперь для проверки вращать столик микроскопа, то полученная темнота останется неизменной. В таком случае полученная плоскость эллипсоида будет плоскостью оптических осей, а перпендикулярная к ней ось — осью n_m . Следует записать отсчет по лимбу i , при котором получено затемнение и снова повернуть препарат вокруг оси I для отыскания второй оптической оси. Часто вторая оптическая ось не может быть приведена в совмещение с осью микроскопа, что, однако, не представляет большого неудобства, влияя лишь на точность определения угла оптических осей. Координаты для плоскости оптических осей (n_m) вместе с отсчетами по лимбу i для оптических осей записываются примерно так: $n = 197^\circ$; $h = 41^\circ$; $I = n_m$; $iA_1 = 38^\circ$; $iA_2 = 353^\circ$ (A_1 и A_2 — оптические оси). При значительной разнице показателей преломления минерала и стекла сегментов, в углы наклона кольца i вводится поправка, как указано на стр. 179. 2-й случай. Зерно не погасает при вращении вокруг I . Из этого можно заключить, что найденная плоскость не является плоскостью оптических осей и что ось эллипсоида, совпадающая с осью I , может быть только n_g или n_p . В этом случае наименование оси определяется обычным методом при помощи гипсовой пластинки.

Нахождение второй главной плоскости индикатрисы. Вторую плоскость можно найти, повернув препарат вокруг n до следующего погасания зерна и произведя последовательно вышеописанные операции. Но можно и сразу, прибавив некоторый угол к значению n , получить приблизительно положение двух оставшихся плоскостей. Для этого применяется данная Никитиным формула: $n_2 \approx n_1 \pm \pm (90 - h_1)$, где n_1 и h_1 — координаты первой найденной плоскости. Вычислив приблизительно координату n_2 второй плоскости, приводим столик в соответствующее ей положение и наклоняем вокруг H в противоположную сторону до погасания. После этого, повторяя описанные выше приемы, находим точные координаты второй плоскости.

Нахождение третьей плоскости индикатрисы. Третью плоскость индикатрисы можно совместить с плоскостью симметрии микроскопа только в том случае, если угол h для нее не слишком велик. Как будет показано ниже, можно положение третьей плоскости найти графически на стереографической проекции. Эта плоскость будет проходить в 90° от точки пересечения двух первых плоскостей.

Нахождение двойниковой плоскости и двойниковой оси. Двойниковой осью называется направление, при повороте вокруг которого на 180° из одного индивида двойника выводится другой. Двойниковой плоскостью называется плоскость симметрии перпендикулярная к двойниковой оси.

При совмещении двойниковой плоскости с плоскостью симметрии микроскопа оба индивида двойника будут одинаково освещены и при вращении вокруг оси I двойник будет вести себя как монокристалл. То же будет и после поворота столика микроскопа на 45° , когда двойниковая плоскость займет симметричное положение относительно главных сечений николей.

Если двойниковая плоскость лежит под малым углом к плоскости шлифа, то удобнее привести в вертикальное положение двойниковую ось, совместив ее с осью микроскопа. В этом случае различие между индивидами двойника также исчезает и кристалл ведет себя как один индивид при вращении столика микроскопа.

На практике двойниковая ось и плоскость находятся графическим построением на проекции, и их положение лишь проверяется на федоровском столике.

§ 7. Нанесение результатов измерений при помощи сетки Вульфа¹

Сетка Вульфа представляет собой круг с радиусом, равным 10 см. Внутри основного круга нанесены большие меридиональные и малые широтные дуги через 2° , подобно сети меридианов и параллелей на географической карте (рис. 126).

На основном круге, у одного из полюсов (обычно у южного) ставится 0° . Числа градусов наносятся по часовой стрелке.

Все построения производятся на восковке, которая накладывается на сетку. На восковке отмечают центр и нулевую точку, для того чтобы иметь возможность совмещать восковку с ее первоначальным положением. Для удобства обводят также внешний круг проекции. При всех построениях, при которых приходится вращать восковку, надо следить, чтобы отмеченный центр ее не смещался с центра сетки Вульфа.

Нанесение плоскостей и осей. Плоскости индикатрисы наносятся следующим образом: вращая восковку, совмещают ее нулевую точку с делением на основном круге, которое отвечает координате n . После этого отсчитывают по экваториальному диаметру

¹ Ю. В. Вульф (1863—1925) — один из крупнейших русских кристаллографов.

от центра значение угла h вправо или влево, в зависимости от того, какой край столика был поднят. (Надо отсчитывать в сторону поднятого края столика.) Затем прочерчивают на восковке карандашом, от руки, меридиан, проходящий через найденную точку. Полученная дуга и будет проекцией нашей плоскости индикатрисы. Остается нанести ее полюс. Для этого от точки пересечения экватора сетки с нашей дугой отсчитываем в сторону ее вогнутости по экватору 90° (или от противоположного края сетки отсчитываем по экватору угол h). Около найденной точки ставим ее обозначение: n_g , n_m или n_p . Также поступаем и для нанесения остальных плоскостей индикатрисы. Если были найдены только две плоскости, надо вращением восковки привести точку их пересечения на экваториальный диаметр и, отсчитав от нее по экватору 90° , прочертить соответствующий меридиан. Точки пересечения плоскостей при точной работе должны совпадать с проекциями главных осей индикатрисы.

Если одна из найденных плоскостей есть плоскость оптических осей и одна или обе оптические оси были замерены (отсчетом по лимбу i), их наносят одновременно с нанесением данной плоскости, когда ее проекция совпадает с соответствующим меридианом сетки. По этому меридиану и отсчитывают замеренные значения iA_1 и iA_2 . Значения iA , лежащие между нулем и 90° , отсчитываются от экватора сетки вниз. Значения iA между 270° и 360° отсчитываются от северного полюса к экватору, считая у северного полюса 270° , или, что то же самое, можно откладывать от экватора вверх разность $360^\circ - iA$. В приведенном выше примере ($iA_2 = 353^\circ$) откладываем от экватора вверх 7° .

Если была найдена только одна оптическая ось, то положение второй оптической оси можно определить, измерив угол, образованный первой осью с одной из биссектрис и отсчитав такой же угол по другую сторону от этой биссектрисы. Одновременно получаем угол $2V$ и узнаём знак кристалла (в зависимости от того, какая из осей n_g или n_p является биссектрисой острого угла между оптическими осями).

Плоскости спайности и другие наносятся аналогично плоскостям индикатрисы. Для каждой из плоскостей обязательно наносится и ее полюс.

На проекции можно измерять углы между любыми нанесенными направлениями, например углы между осями индикатрисы и нормальными к граням или плоскостям спайности. Для этого вращением восковки приводим на один меридиан сетки точки, отвечающие двум направлениям, угол между которыми надо измерить. Искомый угол отсчитывается по числу делений на этом меридиане, находящихся между данными точками (каждое деление — 2°).

Определение положения двойниковой оси и двойниковой плоскости.

Если исследуется двойник, то в каждом из его индивидов отдельно находят положение плоскостей и осей индикатрисы. Данные для обоих индивидов наносят на одну восковку (во избежание путаницы,

обычно карандашами разного цвета). Оси индикатрисы одного индивида обозначаются n^1_g , n^1_m и n^1_p ; другого индивида — n^2_g , n^2_m и n^2_p .

Соединим дугами больших кругов одноименные оси обеих индикатрис. Для этого вращением восковки приводим две одноименные оси (например, n^1_g и n^2_g) на один меридиан сетки, который и прочерчиваем. Также поступаем и для двух других пар одноименных осей. Получаем три дуги больших кругов, которые в идеальном случае должны пересечься в одной точке. Эта точка и будет проекцией двойниковой оси данного двойника.

Для построения двойниковой плоскости ставим эту точку на экваторе сетки, отсчитываем от нее по экватору 90° и прочерчиваем соответствующий меридиан.

На практике для двойниковой оси вместо точки обычно получается треугольник, центр которого принимают за проекцию двойниковой оси. Если треугольник велик или сильно вытянут в одном направлении, этот способ дает слишком грубые результаты. В специальных руководствах излагаются и другие более сложные построения, дающие в ряде случаев большую точность.

Найдя двойниковую ось и двойниковую плоскость и отсчитав на проекции их координаты, следует убедиться в правильности результата проверкой на исследуемом зерне под микроскопом, как указано на стр. 182.

§ 8. Поведение одноосного кристалла на федоровском столике. Определение осности. Исследование изотропных разрезов

В индикатрисе одноосных кристаллов — эллипсоиде вращения — любая плоскость, проходящая через оптическую ось, есть плоскость симметрии. Поэтому можно, вращая препарат только вокруг оси N , когда все остальные оси находятся в их исходных положениях, совместить одну из таких плоскостей с плоскостью симметрии микроскопа, т. е. получить погасание, сохраняющееся при вращении препарата вокруг оси I . Следовательно, если ставить одноосный кристалл на погасание (вращением вокруг оси N) и затем проверять полученную темноту вращением вокруг I , то одно из двух положений погасания обязательно даст темноту, сохраняющуюся при вращении вокруг I . В двуосном кристалле, в общем случае, ни одна темнота сохраняться не будет. В частных случаях, когда одна из главных осей индикатрисы лежит в плоскости препарата, то и у двуосного кристалла одна темнота будет сохраняться при вращении вокруг I , а если в плоскости препарата лежат две главные оси, то будут сохраняться обе темноты.

Определение осности на федоровском столике сводится к тому, что кристалл рядом операций ставится заведомо в общее положение, после чего наличие или отсутствие сохраняющейся темноты указывает, является ли кристалл одноосным или двуосным.

Ход определения осности. I. Сечение анизотропно. Поставив столик в исходное положение, вращаем препарат вокруг оси N до погасания исследуемого зерна, а затем наклоняем вокруг I в ту

и другую сторону на возможно больший угол, следя, остается ли зерно темным. После этого поворачиваем вокруг N до второго погасания и также проверяем вращением вокруг I .

Здесь возможны три случая:

А. Ни одна темнота не сохраняется — минерал двуосен.

В. Одна темнота сохраняется.

1. Вращением вокруг N устанавливаем кристалл на сохраняющуюся темноту.

2. Наклоняем вокруг H на $40-50^\circ$.

3. Вращая вокруг оси M , ставим на обе темноты, проверяя каждую их них при наклоне вокруг I . Если ни одна темнота не сохраняется — кристалл двуосен. Если одна темнота сохраняется — кристалл одноосен.

С. Обе темноты сохраняются.

1. Поворачиваем вокруг M на 45° .

2. Поворачиваем вокруг N до погасания.

3. Наклоняем вокруг H на $40-50^\circ$.

4. Вращая вокруг M , ставим кристалл на обе темноты, каждый раз наклоняя вокруг I . Если ни одна темнота не сохраняется — кристалл двуосен, если одна темнота сохраняется — кристалл одноосен.

II. Сечение изотропно. В этом случае исследуемый минерал может быть двуосным или одноосным в сечении перпендикулярном к оптической оси, либо вообще оптически изотропным. Для выяснения этого поступаем следующим образом:

1. Наклоняем препарат вокруг I на $40-50^\circ$ в обе стороны. Если темнота не сохраняется — кристалл двуосен.

2. Если темнота сохраняется, то поворачиваем препарат на $40-50^\circ$ вокруг N и наклоняем вокруг I . Если темнота не сохраняется — кристалл двуосен; если темнота сохраняется, то кристалл одноосен либо оптически изотропен.

Для уточнения последнего обстоятельства вращаем весь столик вокруг оси A при наклоне вокруг I около $40-50^\circ$. Если темнота не сохранилась — кристалл одноосен; если темнота сохранилась — кристалл изотропен.

§ 9. Пятиосный федоровский столик

В 1929 г. Эммонс, в развитие федоровского метода, предложил пятиосный федоровский столик. Ось, добавленная Эммонсом, в исходном положении расположена горизонтально и перпендикулярно к оси H . Отсчет наклонов вокруг этой оси производится при помощи пары дужек, подобных дужкам h , h .

На пятиосном столике можно, совместив одну ось индикатрисы с осью I , расположить другую ось индикатрисы по оси микроскопа, а третью — перпендикулярно к оси I и к оси микроскопа. Этим значительно упрощается и ускоряется исследование, в частности определение ориентировки индикатрисы относительно кристаллографи-

ческих направлений. А. Н. Заварицкий, используя пятиосный столик, разработал «двойной теодолитный метод». Этот метод позволяет обойтись без графических построений на сетке и отсчитывать координаты кристаллографических направлений по отношению к осям индикатрисы непосредственно по лимбам столика. В настоящее время (1947 г.) пятиосные федоровские столики выпускаются Опытным оптико-механическим заводом треста «Русские самоцветы» в Ленинграде.

ЛИТЕРАТУРА

Главнейшие руководства по федоровскому методу на русском языке:

- М. А. Усов. Метод Федорова или универсальный метод определения породообразующих минералов, в особенности полевых шпатов. Томск, 1910.
 В. В. Никитин. Универсальный метод Федорова. Вып. 1, СПб., 1911; вып. 2, СПб., 1912; вып. 3, Пг., 1915—1923.
 А. К. Подногин. Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу Е. С. Федорова. ОНТИ. Ленинград, 1933.

О пятиосном столике:

- R. C. E m m o n s. A modified Universal Stage. Amer. Miner., 14, 1929.
 R. C. E m m o n s. The Universal Stage (with five axes of rotation). Geol. Soc. of America, memoir 8, 1943.
 А. Н. Заварицкий. Дальнейший шаг в применении универсального столика. Зап. Всеросс. Минер. общ., ч. LXXII, № 2, 1943.

ЧАСТЬ II

ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Области применения иммерсионного метода

При работе иммерсионным методом исследуемое вещество в виде порошка помещается на предметное стекло и заливается какой-либо жидкостью известного показателя преломления (*immersion* — погружение, затопление). В таком препарате могут быть определены все те свойства кристаллов, которые определяются в шлифах и, вдобавок, измеряются показатели преломления. Чтобы найти последние, вещество рассматривают последовательно в ряде жидкостей, в каждой из которых, при помощи полоски Бекке или эффекта косоого освещения (см. ниже), определяют больше или меньше показатель преломления вещества, чем данной жидкости. Таким путем подбирают жидкость с показателем преломления, равным показателю исследуемого вещества.

Давая дополнительно ко всем прочим характеристикам такую важную константу, как показатель преломления (а для оптически-анизотропных тел — два или три показателя преломления), иммерсионный метод значительно расширяет возможности определения вещества по его оптическим свойствам. При изучении изверженных и метаморфических пород иммерсионный метод играет лишь второстепенную роль, так как для характеристики этих пород очень большое значение имеет их структура, которая может наблюдаться только в шлифах. К тому же число породообразующих минералов сравнительно невелико, и для их распознавания в большинстве случаев достаточно данных, получаемых при исследовании шлифов. Иммерсионным методом при исследовании этих пород пользуются главным образом для уточнения констант уже известных, определенных в шлифе минералов, а также при изучении аксессуарных минералов пород.

Определение минералов в иммерсионных препаратах приходится производить при детальном изучении ассоциации того или иного месторождения, при находке отдельных минералов, трудно определенных по внешнему виду и другим признакам и при исследовании шлихов.

Особенно велико значение иммерсионного метода в области изучения осадочных пород. Для рыхлых обломочных пород он является по суще-

ству единственным методом оптического исследования, для остальных осадочных пород — главнейшим. Своим развитием и широким распространением иммерсионный метод обязан в первую очередь своему применению в области изучения нефтеносных отложений, имеющему большое практическое значение.

Кроме наук геологического цикла, иммерсионный метод должен находить применение и в различных областях химии: при изучении компонентов равновесных систем, при исследовании продуктов химической технологии, при качественном микроскопическом анализе и т. д. Здесь особенно важно, что этот метод непосредственно указывает, какие именно химические соединения входят в состав исследуемой смеси. Преимуществом его является также крайне незначительное количество вещества, потребное для анализа (доли миллиграмма). Однако до сих пор иммерсионный метод анализа почти не применяется в практике химических научно-исследовательских институтов и, особенно, заводских лабораторий. Единственной причиной этого обстоятельства является то, что работники химии за немногими исключениями не только не владеют кристаллооптическими методами диагноза вещества, но и незнакомы с возможностями этих методов.

Глава XVI

ИММЕРСИОННЫЕ СРЕДЫ

§ 1. Иммерсионные жидкости

Для определения показателей преломления иммерсионным методом служит так называемый иммерсионный набор, состоящий обычно из 30—50—100 флакончиков емкостью около 1—2 мл, содержащих жидкости с различными показателями преломления в интервале от 1,4 до 1,8. Для составления иммерсионного набора берут несколько жидкостей в качестве исходных. Промежуточные показатели преломления получают, смешивая исходные жидкости попарно в различных пропорциях. Флакончики иммерсионного набора, плотно закрытые притертыми стеклянными пробками, хранятся в закрытом деревянном ящике, имеющем гнезда по числу флакончиков.

Жидкости, употребляемые для определения показателей преломления, должны удовлетворять ряду требований, а именно:

- 1) Они не должны реагировать с исследуемым веществом.
- 2) Они должны быть достаточно устойчивы химически и не изменять свой показатель преломления при хранении.

3) Они не должны сильно менять свой показатель преломления с изменением температуры. Для большинства применяемых жидкостей температурный коэффициент $\frac{dn}{dt}$ ¹ колеблется от 0,0004 (для низкопреломляющих) до 0,0007 (для высокопреломляющих).

4) Все жидкости набора должны быть взаимосмешивающимися. В противном случае, при замене одной жидкости в препарате другой, следы первой жидкости образуют оболочки вокруг исследуемых зерен.

5) Жидкости, из которых готовятся смеси, должны обладать близкими скоростями испарения при комнатной температуре. В противном случае показатель преломления смеси заметно изменится с течением времени за счет большего испарения одного из компонентов.

6) Жидкости не должны быть сильно летучими. Иногда все же приходится применять такие жидкости (хлороформ, амиловый спирт и др.), но ни в коем случае нельзя вводить их в состав смесей набора.

7) Крайне неудобны в работе вязкие, густые жидкости (некоторые сорта кедрового масла, касторовое масло и др.).

При исследовании минералов (и вообще неорганических соединений) пользуются обычно жидкими маслами и другими жидкими органическими соединениями. Таких жидкостей, удовлетворяющих всем или главнейшим из перечисленных требований, известно много. Приводим с некоторыми изменениями список иммерсионных жидкостей по Шредер Ван-дер-Кольку, дополненный по данным других авторов.

Показатели преломления, приведенные в этой таблице, являются лишь ориентировочными. Для большинства жидкостей они колеблются в зависимости от примесей и способа изготовления.

Температурный коэффициент $\frac{dn}{dt}$ для жидкостей с малыми показателями преломления (до 1,49) можно принимать равным 0,0004. Для большинства остальных жидкостей — 0,0005. Для иодистого метилена он равен 0,0007.

Приведенный список отнюдь не является исчерпывающим.²

§ 2. Высокопреломляющие жидкости

Более высокие показатели преломления, чем 1,78, можно получить, растворяя в иодистом метилена серу, SnJ_4 и SbJ_3 . Мервин получал жидкости с показателями до 1,868, растворяя в иодистом

¹ Температурный коэффициент $\frac{dn}{dt}$ показывает, насколько понижается показатель преломления при повышении температуры на 1° С.

² Дополнительные данные см. Н. Е. Веденеева. Лабораторное руководство по иммерсионному методу. Труды Института минерального сырья, вып. 124, 1937, стр. 62, а также в ряде статей сборника «К практике иммерсионного метода» под ред. Н. Е. Веденеевой, изд. Института минерального сырья, 1936.

Список иммерсионных жидкостей

№ по порядку	Жидкости	n_D при 20° С	$\frac{dn}{dt}$	Температура кипения в °С	Примечания
1	Метиловый спирт	1,329		66	
2	Ацетон	1,360		56,5	
3	Этиловый спирт	1,362	0,00040	78	
4	Паральдегид	1,404			
5	Этилмонохлорацетат	1,422	0,00049		
6	Этилдихлорацетат	1,437	0,00043		
7	Хлороформ	1,445		61,5	
8	Хлористый этилен	1,448			
9	Изоамилсульфид	1,450	0,00044		
10	Четыреххлористый углерод	1,460		77	
11	Лавандовое масло	1,462		188	окисляется
12	Метилтиоцианат	1,467	0,00052		
13	Оливковое масло	1,467			
14	Терпентиновое масло	1,470			
15	Миндальное масло	1,473			окисляется
16	Буковое масло	1,473			
17	Касторовое масло	1,480			
18	Ксилол	1,485		265	
19	Метилфурфурат	1,487	0,00044	136	
20	Цимол	1,490		175	
21	Этиленхлоробромид	1,492	0,00052		
22	Толуол	1,500		110	
23	Бензол	1,500		80	
24	Псевдокумол	1,505		170	
25	Кедровое масло	{ 1,504— 1,516		237	окисляется
26	Пентахлорэтан	1,510	0,00048		
27	Иодистый этил	1,512		162	
28	Бромистый пропилен	1,519	0,00049	72	
29	Монохлорбензол	1,523		132	
30	Укропное масло	{ 1,529— 1,535		188	
31	Salicylsäures methylester	1,537			
32	Бромистый этилен	1,537	0,00054	130	очень ядовит
33	Гвоздичное масло	1,544		253	окисляется
34	Нитротолуол	1,547	0,00053	223	светочувствителен
35	Нитробензол	1,552	0,00046	209	
36	Анисовое масло	{ 1,547— 1,553		220	
37	Диметиланилин	1,556		192	светочувствителен

Продолжение

№№ по порядку	Жидкости	n_D при 20° С	$\frac{dn}{dt}$	Температура кипения в °С	Примечания
38	Монобромбензол	1,559		155	
39	Коричноэтиловый эфир	1,560		271	
40	Бензобензиловый эфир	1,569			
41	Ортолуидин	1,571	0,00047	198	светочувствителен
42	Анилин	1,583	0,00045	138	светочувствителен
43	Аллилтрибромид	1,585			и окисляется; очень
44	Монохлоранилин	1,592			большая дисперсия
45	Бромформ	1,596			
46	Коричное масло	{ 1,585— 1,619	0,00057	207 151	светочувствителен
47	Моноидбензол	1,621			окисляется; очень
48	Хинолин	1,626			большая дисперсия
49	α — монохлорнафталин	1,635	0,00053	188	
50	S — тетрабромэтан	1,636			
51	Фенилизотиоцианат	1,649		260	
52	α — монобромнафталин	1,659	0,00051	102	
53	Ортобромидбензол	1,663	0,00054	218,5	
54	α — иоднафталин	1,701			
55	Иодистый метилен	1,743	0,00048 0,00044 0,00070	181	светочувствителен; для удаления вы- деляющегося иода
56	Насыщенный раствор серы в иодистом метиле	1,783			клясть стружки меди, олова

метилене иодоформ, серу, SnJ_4 , AsJ_3 и SbJ_3 . Смесь этих компонентов подогревается для ускорения растворения и отставляется для отстаивания, после чего раствор отфильтровывается. Иодоформ предварительно должен быть очищен перекристаллизацией из эфира.

При еще более высоких показателях преломления обычно приходится пользоваться сплавами, которые далеко не так удобны и точны в работе как жидкости.

Жидкостей с показателем выше 1,87 известно пока очень мало.

В упомянутом выше сборнике «К практике иммерсионного метода» приведены (с указанием источников) извлечения из некоторых работ, посвященных высокопреломляющим жидкостям.

Высокопреломляющие жидкости Мервина¹

CH_2J_2	CHJ_3	SnJ_4	AsJ_3	SbJ_3	S	n_{Na} при 20° C
100 частей	—	—	—	12	—	1,764
100 "	—	25	—	—	—	1,783
100 "	—	25	—	12	—	1,806
100 "	—	30	—	—	16	1,820
100 "	—	27	13	7	—	1,826
100 "	40	27	16	—	—	1,842
100 "	—	31	14	8	10	1,853—1,860
100 "	35	31	16	8	10	1,863

Там указаны:

1) Раствор серы и тетраиодэтилена (C_2J_4) в иодистом метиле. $n_D = 1,81$.

2) Фенилдиодарсин ($\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{AsJ}_2$). $n_D = 1,843$. Ядовит, попадая на кожу, вызывает ожоги.

3) Бромистый селен (Se_2Br_2). Приготавливается присоединением Br к Se. $n_{Li} = 1,96 \pm 0,01$. На воздухе, вследствие частичного разложения, показатель повышается до 2,02. Для всех лучей, кроме темно-красных, прозрачен только в тонком слое. Может смешиваться с иодистым метиленом.

4) Растворы SbBr_3 и SnJ_4 в иодистом метиле. Максимальный показатель преломления $n_D = 1,86$.

Наиболее высокопреломляющей из предложенных до сих пор является жидкость Веста — концентрированный раствор фосфора в иодистом метиле с серой (American Mineralogist, № 4, 1936). Ее показатель преломления достигает 2,06. Однако свойства этой жидкости (самовозгорается на бумаге и дереве) исключают возможность ее широкого применения.

§ 3. Водные растворы

Если исследуемое вещество поддается действию органических растворителей, жидкости обычного иммерсионного набора оказываются непригодными. В этом случае могут быть применены высокопреломляющие водные растворы — жидкость Туле (показатель до 1,71) и жидкость Сушина-Рорбаха (показатель до 1,79). Эти жидкости имеются в продаже в готовом виде, но могут также быть изготовлены в лаборатории.

¹ Цитируется по книге Лодочникова.

Жидкость Туле представляет собой водный раствор двойной соли $\text{HgJ}_2 \cdot 2\text{KJ}$. Для ее приготовления берется смесь красной двуокисной ртути и иодистого калия в отношении 1,24 : 1 (277 г HgJ_2 на 223 г KJ). Смесь эта растворяется в небольшом количестве холодной воды (500 г смеси на 80 мл воды), и раствор выпаривается в фарфоровой чашке при 60°C до тех пор, пока на краях не начнет образовываться корочка. Затем жидкость охлаждается и фильтруется. Наиболее концентрированный раствор имеет показатель преломления 1,718 (при 18°C). Разбавление водой позволяет получать любой более низкий показатель. При продолжительном стоянии на свету жидкость разлагается и темнеет от выделяющегося иода.

Жидкость Сушина-Рорбаха аналогична жидкости Туле, представляя собой водный раствор $\text{HgJ}_2 \cdot \text{BaJ}_2$. При приготовлении этой жидкости приходится принимать ряд предосторожностей, ввиду легкой разлагаемости иодистого бария. По Рорбаху, на 130 г HgJ_2 берется 100 г BaJ_2 . Эти вещества быстро отвешиваются в сухой посуде и хорошо перемешиваются. Затем смесь заливается 20 мл дистиллированной воды и ставится на масляную баню, нагретую до $150\text{--}200^\circ\text{C}$. При нагревании для ускорения образования двойной соли и растворения все время перемешивают. Раствор оставляют 2—3 дня отстаиваться в темном месте в сосуде с притертой пробкой, после чего сливают с образовавшегося осадка. Насыщенный раствор имеет показатель преломления 1,795 (при 20°C). Для получения меньшего показателя, во избежание выпадения HgJ_2 , надо либо прибавлять воду по каплям к нагретому почти до кипения раствору, либо осторожно налить воду (лучше — слабый раствор иодистого калия) слоем на поверхность жидкости и оставить на сутки для диффузии.

Жидкости Сушина-Рорбаха и Туле ядовиты и при продолжительном действии на кожу вызывают долго не заживающие язвы. При изготовлении этих жидкостей рекомендуется надевать хирургические перчатки.

Показатели преломления разбавленных водой жидкостей, вследствие испарения, довольно быстро повышаются и нуждаются в частой проверке.¹

§ 4. Сплавы для определения высоких показателей преломления

В стандартных иммерсионных наборах имеются жидкости с показателем преломления до 1,78. Более высокие показатели преломления измеряются при помощи специальных сплавов, имеющих невысокую температуру плавления. Обычно применяются сплавы пиперина с иодидами мышьяка и сурьмы (до $n = 2,1$) и сплавы серы с селеном (до $n = 2,7$).

¹ Показатели преломления жидкостей Туле и Сушина-Рорбаха изменяются и в микроскопических препаратах. Поэтому, во избежание ошибок, необходимо производить наблюдение сразу же после изготовления препарата, пока показатель преломления не успел измениться.

Сплавы пиперина с AsJ_3 и SbJ_3 .¹ Пиперин хорошо растворим в хлороформе и уксусной кислоте; в чистом виде бесцветен, имеет средний показатель преломления $\sim 1,68$ и обладает большой дисперсией показателей.

Как пиперин, так и особенно иодиды для приготовления сплавов применяются в очищенном виде. При наличии даже весьма небольших загрязнений сплавы получаются темными и даже почти непрозрачными. Для очистки иодиды могут быть растворены в горячем ксилоле, отфильтрованы в горячем состоянии и выкристаллизованы при охлаждении. (Эту же процедуру можно применить для приготовления самих иодидов, так как мышьяк и сурьма легко соединяются с иодом в горячем ксилоле.)

Расплавленный пиперин, смешиваясь с SbJ_3 и AsJ_3 , образует однородные растворы, жидкие при температурах выше $70\text{--}130^\circ\text{C}$ и застывающие в твердую аморфную массу желто-красного цвета при охлаждении.

Для приготовления сплава иодиды берут в пропорции 3 части SbJ_3 на 1 часть AsJ_3 и смешивают с пиперином в отношении, требуемом для получения нужного показателя преломления (рис. 124, кривая б). Н. Е. Веденеева в упомянутом выше руководстве приводит следующий рецепт изготовления сплавов:

«1. Все три компонента (каждый в отдельности, во избежание преждевременного начала какого-либо взаимодействия) тщательно истираются в фарфоровой ступке. Нужно иметь в виду, что образующаяся при этом мелкая пыль в случае мышьякового соединения вызывает раздражение дыхательных путей и не безвредна для работающего.

2. Отвешенные порошки переносятся в небольшой фарфоровый стаканчик и тщательно перемешиваются так, что смесь принимает однородный вид. Крупные кусочки пиперина и иодидов нежелательны, так как их растворение затягивает процесс сплавления, а недостаточная продолжительность сплавления может привести к тому, что они останутся в сплаве как таковые, и сплав не будет однородным.

3. Порошки сплавляются на электрической плитке, причем между дном стаканчика и плиткой лучше для равномерности нагрева положить мягкий слой асбеста. Перемешивание, крайне существенное для предохранения от местного перегревания, удобно производить с помощью термометра, причем тем самым можно контролировать температуру, не допуская ее повышения выше $129\text{--}130^\circ$. Это особенно важно для сплавов с большим содержанием иодидов, где при перегревании разложение резче выражено. Надо обращать внимание, чтобы на стенках выше поверхности сплава не оставалось совершенно ис-

¹ Литература: Е. Ларсен и Г. Берман, Определение прозрачных минералов под микроскопом, 1937, стр. 17—20.

В. Н. Лодочников, Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества, 1930, стр. 165—167.

Н. Е. Веденеева, Лабораторное руководство по иммерсионному методу, 1937, стр. 46—48 и 64—65.

ходных веществ после сплавления, которое при тщательной подготовке смеси требует непродолжительного времени.

4. Сплав, не успевший ни в коей мере остыть, выливают на металлическую гладкую поверхность и по охлаждении (примерно через 2—3 минуты) снимают, ударив по обратной стороне. Длительное оставление в соприкосновении с воздухом при остывании совершенно излишне. Сплав, разбитый на куски средней величины, переносится в бюксы и тотчас же закрывается. Приготовленные сплавы необходимо беречь от воздействия влаги, света, воздуха, так как влага может

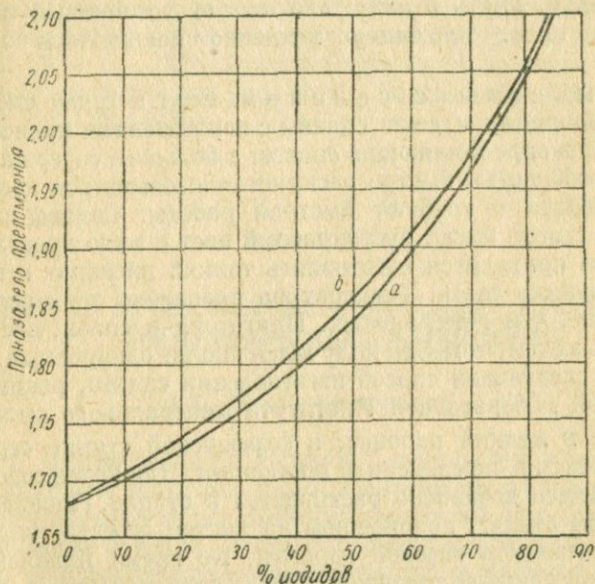


Рис. 127. Кривые зависимости показателей преломления сплавов пиперина с иодидами от состава: *a* — для свежеприготовленных сплавов; *b* — для выдержанных.

вызвать гидролиз иодидов, даже если они и находятся в виде комплекса с пиперином, а свет и тепло могут вызвать процесс выделения иода. Таким образом надо хранить сплавы в темных склянках, в закрытом виде и в сухом помещении».

Показатель преломления сплава можно измерить на гониометре по методу угла наименьшего отклонения (см. гл. XVII, § 3), приготовив из кусочка сплава, расплавленного между двумя тонкими плоскопараллельными стеклами призмочку с небольшим преломляющим углом. Ввиду кропотливости этой операции, к ней прибегают сравнительно редко. Гораздо чаще о показателе преломления судят по составу данного сплава. Ларсен приводит диаграмму, по которой можно найти показатель преломления сплава для натрового света, если известно содержание в нем иодидов (рис. 127, кривые *a* и *b*).

Кривая *a* дает показатели преломления для свежеприготовленных сплавов. Показатель преломления сплава первое время после его изготовления не остается постоянным, а довольно быстро увеличивается в течение примерно месяца. Общее увеличение за это время достигает нескольких единиц третьего знака после запятой. После этого показатель преломления становится устойчивым, и повторное расплавление и затвердевание сплава не оказывают на него влияния. На кривой *b* даны показатели преломления сплавов, имеющие устойчивое значение. Из этой кривой и надо исходить, приготавливая сплавы с наперед заданным показателем преломления. Следует, однако, иметь в виду, что и этот устойчивый показатель преломления имеет тенденцию медленно повышаться с течением времени.

Сплавы серы с селеном. Сера и селен смешиваются в любых пропорциях и дают сплавы с показателями преломления от 2,0 до 2,7. Низкопреломляющие сплавы с большим содержанием серы обладают способностью быстро раскристаллизовываться после изготовления препарата и требуют быстрой работы. Сплавы с высоким содержанием селена имеют густокрасный цвет и мало прозрачны. При работе с ними приходится изготавливать тонкий препарат и применять сильные источники света. Температура плавления этих сплавов значительно выше, чем пипериновых. Приготавливая сплав, следует особенно следить за тем, чтобы он получился вполне однородным. Н. Е. Веденева дает следующий способ изготовления сплава, рекомендуемый Аналитической лабораторией Института минерального сырья:

«Истертые в мелкий порошок в фарфоровой ступке сера с селеном смешиваются в определенной пропорции. Для более совершенного смешивания смесь добавочно растирается в ступке. Плавление ведется на большом стекле, положенном на листок асбеста, укрепленный под слабым пламенем газовой горелки. Во время плавления смесь помешивают стеклянной палочкой. После того как смесь полностью перешла в жидкое состояние, нагревание продолжается еще около одной минуты, после чего сплав снимают с горелки и охлаждают довольно быстро. Сплав выкристаллизовывается, и его без труда отделяют от стекла, после чего снова измельчают и растирают в фарфоровой ступке, так как сплав получается не вполне однородным».

Показатели преломления сплавов при разном содержании в них селена даны в следующей табличке, приводимой Лодочниковым:

°/о селена	n_{Na}	n_{Li}	°/о селена	n_{Na}	n_{Li}
0	1,998	1,978	60	2,274	2,221
10	2,026	2,004	70	2,367	2,300
20	2,060	2,033	80	2,490	2,400
30	2,100	2,069	90	2,670	2,535
40	2,147	2,110	93,5	2,750	2,590
50	2,201	2,159	100	—	2,716

Сплавы селена с селенистым мышьяком. Эти сплавы очень густо окрашены и прозрачны только для красной части спектра. Они дают показатели преломления от $n_{Li} = 2,72$ до $n_{Li} = 3,17$ (подробности см. в указанных выше книгах Ларсена, стр. 20, и Лодочникова, стр. 168).

Смеси галоидных солей таллия. Т. Барт указывает, что для интервала от $n_{Na} = 2,415$ до $n_{Na} = 2,785$ вместо густоокрашенных сплавов серы с селеном можно применять смеси TIVt и TIJ, которые для натрового света прозрачны почти как стекло. К сожалению, дороговизна и дефицитность таллиевых препаратов препятствуют их широкому применению (дополнительные сведения: Лодочников, стр. 17С—17I, 1930. Статью Барта см. в сборнике «К практике иммерсионного метода» под ред. Н. Е. Веденеевой, изд. Ин-та мин. сырья, стр. 26—28, 1936).

Глава XVII

ИЗМЕРЕНИЕ И ПРОВЕРКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ИММЕРСИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

§ 1. Общие замечания

Точность определения показателей преломления иммерсионным методом составляет примерно 0,001. Поэтому на флаконах иммерсионного набора показатели преломления жидкостей обозначаются с тремя цифрами после запятой. Чтобы последняя цифра была правильной, необходимо показатель преломления жидкости измерять с несколько большей точностью, примерно до 0,0005. Приборы для измерения показателей преломления — рефрактометры и гониометры — обычно рассчитаны на большую точность, достигающую единицы четвертого, пятого, а на некоторых приборах даже нескольких единиц шестого знака после запятой. Поэтому, определяя показатели преломления иммерсионных жидкостей, мы не работаем на пределе точности прибора, что во многих случаях позволяет несколько упростить процесс измерения.

На флаконах набора, кроме показателя преломления, необходимо отмечать с точностью до градуса температуру жидкости в момент измерения ее показателя преломления. Если жидкость применяется при другой температуре, чем та, при которой она измерялась, надо вводить поправку, руководствуясь температурным коэффициентом (стр. 190—191), следует помнить, что при повышении температуры показатель преломления жидкости уменьшается (вместе с ее удельным весом).

Показатели преломления твердых тел в пределах точности иммерсионного метода можно считать независимыми от температуры.

§ 2. Рефрактометры

Рефрактометрами называются приборы для измерения показателя преломлений, основанные на наблюдении полного внутреннего отражения света на границе двух сред. Здесь эти приборы будут рассмотрены только в применении к исследованию жидкостей.

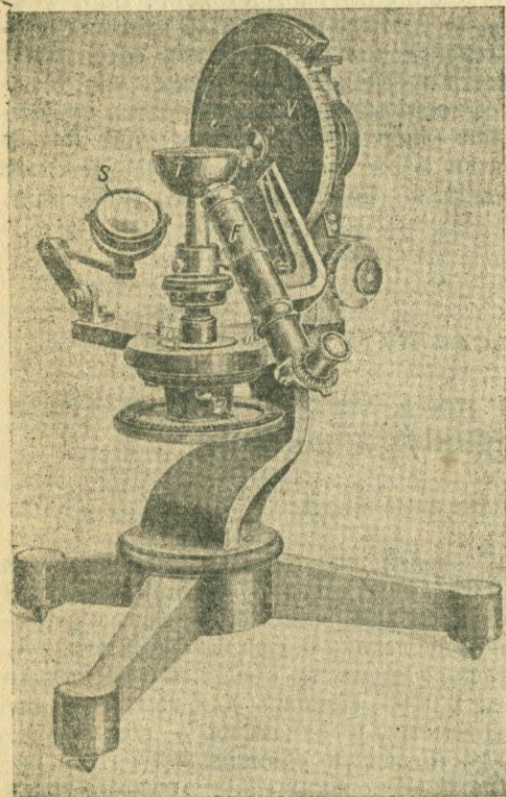


Рис. 128. Рефрактометр с полусферой.

Рефрактометр с полусферой
(рис. 128)

Принцип, лежащий в основе рефрактометрии, наиболее ясно проявляется в рефрактометре с полусферой (рефрактометр Аббе, Аббе — Чапского, Клейна). Главной частью этого прибора служит полусфера T из высокопреломляющего стекла, основание которой обращено кверху и лежит строго горизонтально. На центр основания полусферы наносится капля исследуемой жидкости. При помощи зеркальца S эта капля освещается сквозь полусферу рассеянным монохроматическим светом. Лучи, падающие под углом больше предельного (стр. 14), полностью отразятся от нижней поверхности капли и выйдут через противоположный край полусферы (рис. 129). Лучи, угол падения которых меньше

предельного, преломившись, пройдут через каплю в воздух. (Частично эти лучи также претерпят отражение, но интенсивность отраженной их части настолько мала, что может не приниматься во внимание.) На пути отраженных лучей находится зрительная труба F (рис. 128 и 129). Передвигая эту трубу, наводят крест нитей на границу между светлой и темной частью поля, соответствующую предельному углу полного внутреннего отражения. Отсчет по лимбу V , с которым соединена зрительная труба, непосредственно дает этот угол. Показатель преломления жидкости находится по формуле $n = N \sin \alpha$, непосредственно вытекающей из выражения $\sin \alpha = \frac{n}{N}$ (введение § 5).

Здесь n — показатель преломления жидкости, N — показатель преломления стекла полусферы, α — измеренный предельный угол.

Точность определения — одна-две единицы четвертого десятичного знака. Принимая ряд предосторожностей и пользуясь микрометричным барабаном, можно точность значительно повысить.

Капля жидкости после измерения удаляется фильтровальной бумагой (осторожно! не надавливать во избежание нарушения юстировки полусферы). Затем поверхность промывается одной-двумя каплями спирта или иного летучего растворителя и снова вытирается фильтровальной бумагой.

Как следует из формулы $\sin \alpha = \frac{n}{N}$, измерение на рефрактометре возможно только в случае, если $n < N$. Наиболее распространены рефрак-

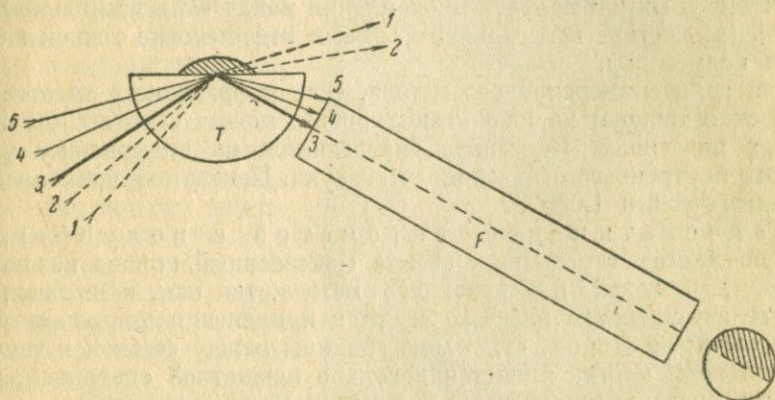


Рис. 129. Ход лучей в рефрактометре с полусферой.

тометры с $N = 1,74 - 1,79$, но встречаются также с N , достигающим до 2,0 и позволяющим, следовательно, промерять все жидкости иммерсионного набора.

Высокопреломляющее свинцовое стекло полусферы значительно мягче обычного. Чтобы не поцарапать его, каплю наносят оплавленной стеклянной палочкой, по возможности не касаясь стекла полусферы.

Более подробное описание этого прибора и его применения к измерению показателей преломления твердых тел см. П. Грот, Физическая кристаллография, стр. 707 и след. Важные дополнения относительно измерения главных показателей преломления кристаллов — у В. В. Доливо-Добровольского, Курс кристаллографии, 1937, стр. 321—322. Ряд практических замечаний и главнейшая иностранная литература — у А. К. Болдырева. Некоторые приемы работы с рефрактометром Аббе..., Геолразведиздат, 1933.

Более простая конструкция этого прибора не имеет лимба. Зрительная труба закреплена неподвижно. В поле зрения трубы находится шкала, по которой отсчитывается предельный угол (в некоторых моделях — непосредственно, показатель преломления). Точность такого прибора обычно 2—3 единицы третьего десятичного знака.

Определение константы рефрактометра. Константой рефрактометра является N — показатель преломления стекла полусферы. Для точной работы эту константу определяют при помощи эталонов — стеклянных пластинок, показатель преломления которых известен с большой точностью. Такую пластинку кладут на полусферу, измеряют предельный угол и, зная n пластинки, вычисляют N полусферы. Во избежание полного внутреннего отражения от тонкого слоя воздуха между пластинкой и полусферой, на последнюю предварительно помещают маленькую каплю жидкости с показателем преломления, промежуточным между n и N . Жидкость эта под пластинкой растекается в тонкий слой и вытесняет воздух. Обычно применяют несколько эталонных пластинок с разными показателями преломления, так как константа рефрактометра для разных интервалов измеряемых показателей преломления может быть несколько различной (вследствие неидеальной формы и недостаточно точной юстировки полусферы).

Для целей иммерсионного метода, если рефрактометр изготовлен достаточно точно и хорошо отъюстирован, можно обойтись без эталонных пластинок. Константа определяется по предельному углу полного внутреннего отражения от воздуха. Показатель преломления последнего равен 1,00028.

Недостатки рефрактометра с полусферой. Этот во многих отношениях весьма совершенный прибор не вполне удобен для целей иммерсионного метода, так как, во-первых, он требует затемненного рабочего места и применения монохроматического света; во-вторых, отыскание границы между светлой и темной частями поля иногда является довольно мешкотной операцией, так как при передвижении зрительной трубы необходимо все время менять и положение зеркала. Этих недостатков лишен следующий рассматриваемый нами прибор.

Рефрактометр с составной призмой

Этот рефрактометр (рефрактометр Аббе, Аббе — Пульфриха) монтирован на штативе, напоминающем штатив микроскопа (рис. 130). Главной частью прибора является прямоугольная призма из высокопреломляющего стекла, состоящая из двух треугольных призм P и Q , примыкающих друг к другу своими диагональными поверхностями. Нижняя призма Q откидывается на шарнире. Грань ее, примыкающая к верхней призме, сделана матовой для получения рассеянного света.

При измерении призму раскрывают, на ее матовую поверхность наносят каплю жидкости и снова закрывают. Свет на призму направляется снизу при помощи зеркала S . При помощи алидады A , снабженной нониусом, призму поворачивают до тех пор, пока граница между светлой и темной частями поля не совпадет с крестом нитей в окуляре зрительной трубы T . На шкале K по положению нониуса алидады непосредственно отсчитывают показатель преломления жидкости для желтого света ($\lambda = 589 \text{ м}\mu$).

Прибор освещается обычным белым светом. При этом граница светлой и темной частей поля, вследствие дисперсии, имеет вид радужной полосы. Чтобы уничтожить окраску, вращают головку барабана *C*, в котором находятся две особые призмы, служащие для компенсации дисперсии. По окружности барабана *C* нанесена шкала, по которой в момент исчезновения окраски можно определить величину дисперсии показателей преломления исследуемой жидкости.

Для точных измерений прибор юстируют, пользуясь специально прилагаемым кусочком стекла с известным показателем преломления. Откинув нижнюю призму, приклеивают с помощью капли α -монобромонафталина юстировочное стекло к нижней поверхности верхней призмы. Затем, поставив алидаду *A* на отсчет, соответствующий показателю преломления стекла, приводят границу светлой и темной частей поля на крест нитей, вращая особый винтик *V*. Когда это достигнуто, прибор юстирован. Юстировку необходимо время от времени проверять.

В металлической оболочке призм *P* и *Q* имеется 5 отверстий. В одно из них ввинчивается термометр *T*, показывающий температуру жидкости в момент измерения. Остальные четыре отверстия посредством системы резиновых трубок могут быть соединены со специальным резервуаром с горячей водой. Это устройство дает возможность измерять

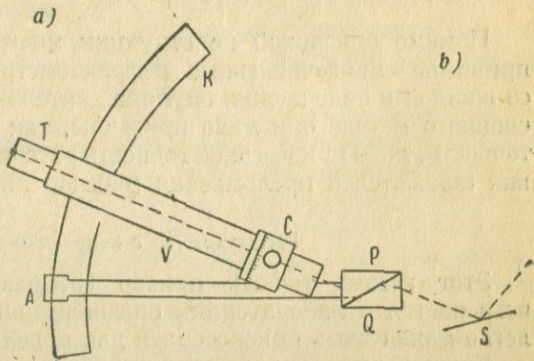
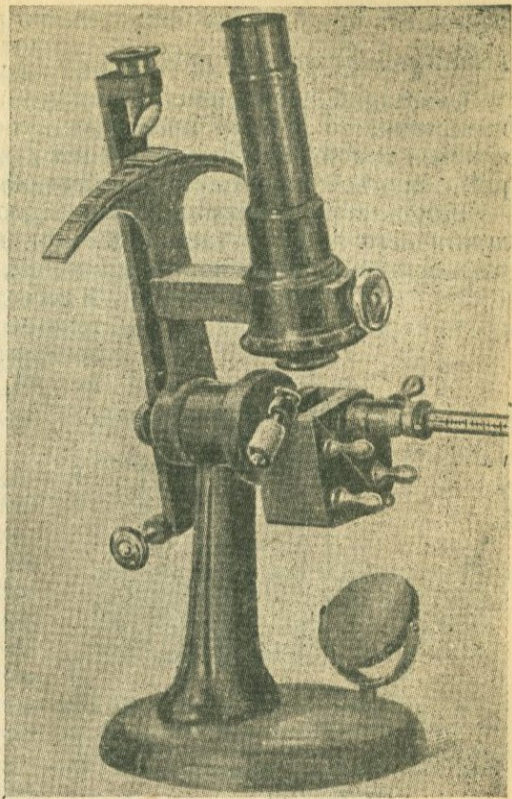


Рис. 130. Рефрактометр с составной призмой: а) — общий вид, б) — схематический чертеж.

показатель преломления жидкости при разных температурах и определять температурный коэффициент $\frac{dn}{dt}$.

Описанный рефрактометр является наиболее удобным для целей иммерсионного метода. Возможность пользоваться белым светом и крайняя простота работы позволяют даже малоквалифицированному работнику производить сотни измерений в течение нескольких часов.

Результаты получаются с точностью до 5—6 единиц четвертого десятичного знака (в зависимости от модели прибора). Интервал, в пределах которого возможно измерение, обычно от 1,45 до 1,70—1,74.

В последнее время появились рефрактометры этого типа, позволяющие измерять показатели преломлений до 1,84.

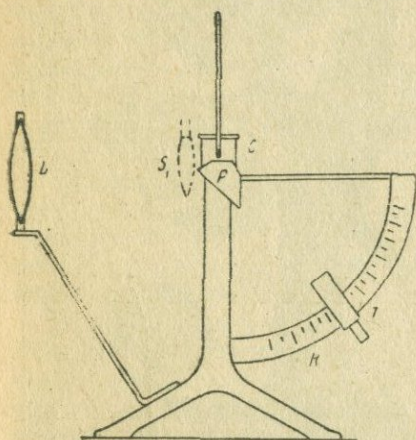


Рис. 131. Схема рефрактометра Пульфриха.

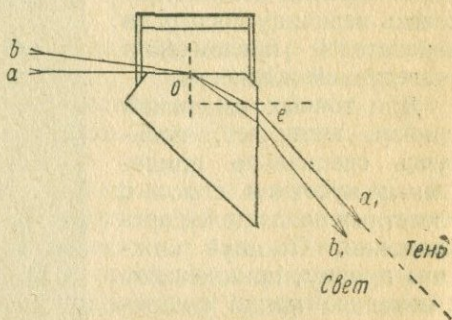


Рис. 132. Ход лучей в призме рефрактометра Пульфриха.

Помимо описанной конструкции, имеются основанные на том же принципе многочисленные рефрактометры для специальных целей со шкалой в поле зрения окуляра зрительной трубы. Для целей иммерсионного метода они мало пригодны, так как они либо дают малую точность, либо при высокой точности рассчитаны на весьма узкий интервал показателей преломления (обычно низкий).

Рефрактометр с неподвижной призмой

Этот весьма точный прибор (рефрактометр Пульфриха) часто встречается в лабораториях органической химии и в случае нужды легко может быть приспособлен для целей иммерсионного метода.

Главной частью прибора является прямоугольная призма P (рис. 131) из высокопреломляющего стекла. Одна из взаимноперпендикулярных граней этой призмы обращена вверх и расположена горизонтально, другая обращена к зрительной трубе T, которая может передвигаться относительно лимба K. (Труба имеет не показанный на схеме коленчатый изгиб, позволяющий вести наблюдение не наклоняясь.) К горизонтальной поверхности призмы приклеен полый стеклянный ци-

линдр C ; внутрь которого наливается исследуемая жидкость. Источник монохроматического света помещается в 20—30 см от линзы L так, чтобы вблизи цилиндра с жидкостью получалось действительное перевернутое изображение пламени S_1 (в чем можно убедиться, помещая перед призмой кусок бумаги). Впрочем, чтобы усилить освещение, можно ставить источник света и ближе к прибору. Свет входит в жидкость почти параллельно горизонтальной поверхности призмы и, преломляясь, выходит через плоскость, обращенную к зрительной трубе (рис. 132). Совместив крест нитей окуляра зрительной трубы с границей между светлым и темным полями, измеряем угол e . Показатель преломления жидкости n вычисляется по формуле $n = \sqrt{N^2 - \sin^2 e}$, где N — показатель преломления стекла призмы.

Обычно к прибору прилагаются специальные таблицы, где даны значения n , соответствующие разным углам e .

По окончании измерения удаляют жидкость при помощи пипетки; можно также, сняв призму с цилиндром со штатива, просто вылить жидкость. После этого необходимо проверить место нуля. Споласкивают цилиндр спиртом или эфиром и осторожно вытирают тряпочкой из чистого стирального полотна.

В описанном виде прибор мало удобен для наших задач, так как требует для измерения довольно значительных количеств жидкости (около 0,5 мл). Кроме того, много времени отнимает очистка цилиндра от остатков жидкости.

Чтобы приспособить прибор для целей иммерсионного метода, мы сделали следующее: удалили цилиндр (в случае надобности он может быть снова приклеен) и во время измерения помещали на поверхность призмы особый мостик, сделанный из трех кусочков покровного стекла размером 6×10 мм (можно и несколько больше). Эти стеклышки склеиваются каким-либо цементом или расплавленной солью (но не канадским бальзамом!), как показано на рис. 133, чтобы под верхним стеклышком получился просвет площадью 5—6 на 6—8 мм. Лучше, если толщина боковых стеклышек несколько больше нормальной, что увеличивает высоту просвета. Мостик кладут на призму рефрактометра, располагая длинную сторону перпендикулярно направлению луча. Под мостик со стороны, противоположной источнику света, подводят несколько капель исследуемой жидкости, которая заполняет весь просвет и дает спереди вертикальную стенку. При избытке жидкости стенка получается выпуклой. Избыток удаляется прикладыванием фильтрованной бумажки со стороны, противополож-

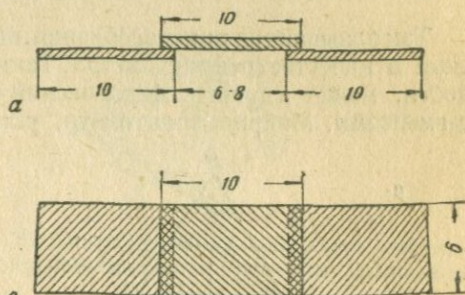


Рис. 133. Мостик к рефрактометру Пульфриха для измерения показателей преломления иммерсионных жидкостей: a — вид спереди; b — вид снизу.

ной осветителю. Граница между светом и тенью получается несколько менее четкой, чем при наблюдении с цилиндром, и точность измерения несколько понижается. Однако возможная погрешность не превышает 2—3 единицы четвертого десятичного знака, что более чем достаточно для наших целей. При измерении показателей преломления, близких к показателю обыкновенного стекла (1,51—1,52), надо остерегаться ошибок, так как стекло мостика также дает границу в поле зрения трубы.

После измерения мостик снимается, и жидкость удаляется при помощи плотной фильтровальной бумаги и нескольких капель спирта.

Микрорефрактометры

Так называются приспособления, позволяющие использовать микроскоп в качестве рефрактометра. Таким микрорефрактометром, в частности, может служить федоровский столик с высокопреломляющими сегментами. Микрорефрактометр, устроенный по типу рефрактометра

с разъемной призмой, подробно описан Н. Е. Веденевой (Лабораторное руководство по иммерсионному методу, Труды ВИМС, вып. 124, 1937, стр. 25. См. также Труды Института прикладной минералогии, вып. 61, 1934, стр. 5—12). Предложен и целый ряд других конструкций.

§ 3. Гониометр

Все рефрактометры обладают одним общим недостатком: они применимы только для тех жидкостей, показатель преломления которых ниже показателя стекла прибора. Для высокопреломляющих жидкостей приходится пользоваться гониометрическим способом измерения, который

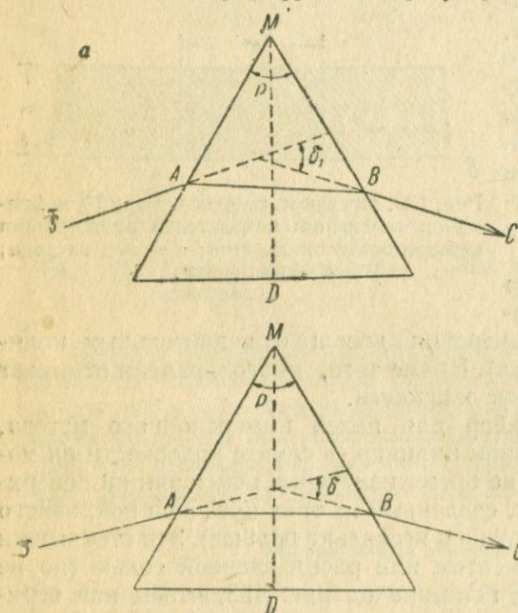


Рис. 134.

требует довольно много времени, но свободен от указанного недостатка. Способ этот основан на измерении угла наименьшего отклонения лучей призмой, сделанной из исследуемого вещества.

Пусть луч SA падает на призму M . Луч этот преломляется дважды: при входе в призму и при выходе из нее (рис. 134, а). По выходе из призмы луч пойдет по направлению BC , делающему с первоначальным

направлением SA угол δ_1 , называемый углом отклонения. Если изменять положение призмы относительно луча SA , угол δ_1 будет изменяться. Теория показывает, что угол отклонения имеет наименьшую величину δ , когда луч в призме идет параллельно основанию (вернее, перпендикулярно к биссектрисе MD преломляющего угла P) (рис. 134, *b*). Если угол наименьшего отклонения δ и преломляющий угол P известны, показатель преломления вещества призмы вычисляется из формулы;

$$n = \frac{\sin \frac{\delta + P}{2}}{\sin \frac{P}{2}}$$

(вывод формулы дается в большинстве курсов физики).

Если исследуется, как в нашем случае, жидкость, то она наливается в полую призму, составленную из плоскопараллельных стеклянных пластинок, заключенных в металлический футляр (рис. 135).

Измерение углов P и δ производится на однокружном гониометре.¹

§ 4. Эталоны для проверки показателей преломления жидкостей

Рефрактометр необходим при составлении иммерсионных наборов и при детальном исследовании минералов с точным определением оптических констант. Работники, пользующиеся иммерсионным методом не для измерения показателей преломления с максимально доступной этому методу точностью, а только для определения минералов по их оптическим свойствам, могут обходиться без рефрактометра. Как будет показано ниже, большой точности измерения показателей преломления в этом случае не требуется. Работая с иммерсионным набором, достаточно время от времени (1—2 раза в год или перед ответственными определениями) проверять показатели преломления жидкостей при помощи эталонов — твердых тел, показатели преломления которых известны. Очень удобен набор эталонов, состоящий

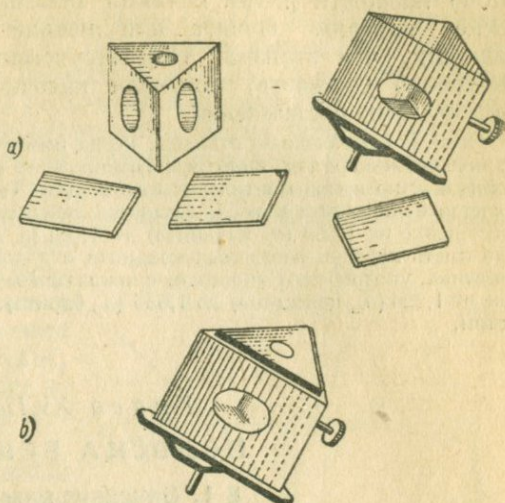


Рис. 135. Полая призма для измерения показателей преломления жидкостей в разобранном и собранном виде.

¹ Детальное и обстоятельное описание этого прибора и приемов работы с ним можно найти у Грота. П. Грот, Физическая кристаллография, СПб., 1897, стр. 651—658 и 680—681.

из семи предметных пластинок, на каждой из которых наклеены пять стеклышек с различными показателями преломления. Помещая каплю жидкости рядом с таким стеклышком, с помощью полоски Бекке находим больше или меньше показатель преломления жидкости, чем эталона. При отсутствии такого набора его можно постепенно составить, подбирая кусочки материалов с известными показателями преломления.

Особенно необходимы эталоны, когда иммерсионный метод применяется для различения минералов, мало отличающихся по показателю преломления и тождественных по прочим оптическим свойствам. Так, например, кальцит легко отличается от доломита в любой жидкости, показатель преломления которой лежит в интервале от 1,658 (n_0 кальцита) до 1,681 (n_0 доломита). В качестве эталонов надо иметь кусочки заведомых кальцита и доломита. Чтобы отличить барит от целестина, употребляют жидкость с показателем преломления, лежащим в интервале от 1,624 (n_m целестина) до 1,636 (n_p барита). Эталоны служат барит и целестин.

Глава XVIII

ПОЛОСКА БЕККЕ

§ 1. Описание явления

Полоска Бекке наблюдается под микроскопом на контакте двух сред, имеющих разные показатели преломления (разные минералы или минерал и канадский бальзам в шлифе, исследуемое вещество и жидкость в иммерсионном препарате).

Чтобы увидеть полоску Бекке, помещаем близ центра поля зрения границу раздела двух сред и при выдвинутом анализаторе фокусируем микроскоп (увеличение среднее или сильное, диафрагма прикрыта). Затем будем слегка нарушать фокусировку, медленно передвигая тубус вверх и вниз в таких пределах, чтобы предметы еще оставались заметными (передвигать микрометренным винтом; при среднем увеличении можно и кремальерой). При этом от границы двух сред отделится тонкая каемка (полоска Бекке), несколько более светлая, чем окружающее поле зрения. Эта каемка, перемещаясь параллельно самой себе, будет сдвигаться на одну из двух сред. Если движение тубуса изменить на противоположное, светлая каемка пойдет обратно, снова сольется с границей и затем перейдет на вторую среду. При этом оказывается справедливым следующее правило: При поднятии тубуса полоска Бекке переходит на вещество с более высоким показателем преломления. При опускании тубуса — на вещество с более низким показателем преломления.

Если исследуемое зерно невелико, то при переходе на него полоски Бекке оно в целом становится светлее, чем окружающая среда, при переходе же полоски с зерна на жидкость оно становится темнее.

Таким образом по полоске Бекке можно судить, больше или меньше показатель преломления зерна, чем окружающей его жидкости.

§ 2. Причина появления полосы Бекке

Рис. 136 изображает вертикальный разрез микроскопического препарата, в котором имеются два вещества — *I* и *II* с разными показателями преломления, причем $n_1 < n_2$. (На рисунке направления преломленных лучей вычерчены из расчета: $n_1 = 1,55$; $n_2 = 1,60$.) Пусть граница раздела веществ *I* и *II* расположена вертикально. Лучи a_1 и a_2 , идущие наклонно к вертикали, пересекают границу раздела в точке *D*. Луч a_1 выйдет из препарата на стороне вещества *II*, а луч a_2 — на стороне вещества *I*. Далее возьмем лучи b_1 и b_2 , идущие почти вертикально. Луч b_1 , подойдя к границе раздела из среды *I*, преломится и войдет в среду *II*. Луч b_2 , идущий из среды *II* с более высоким показателем преломления, испытает на границе полное внутреннее отражение (угол падения b_2DK_2 больше предельного) и выйдет из препарата, как и луч b_1 на стороне среды *II*.

Таким образом, от любой точки границы раздела на сторону среды с большим показателем преломления идет больше света, чем на сторону среды с меньшим показателем преломления. Если диафрагму осветительного аппарата закрыть настолько, чтобы косые лучи a_1 , a_2 и смежные с ними (на чертеже не показаны) были задержаны, то свет через границу раздела в сторону среды *I* проходить не будет. Останется только пучок света, идущий в сторону

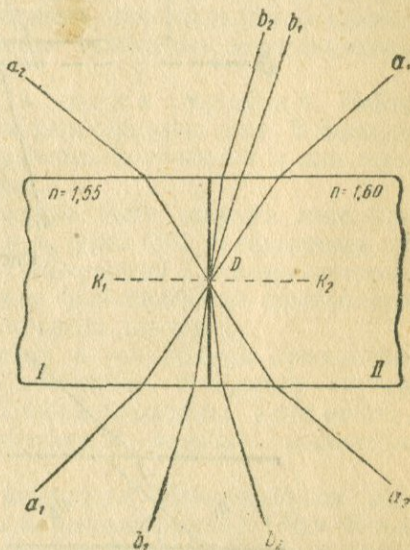


Рис. 136.

среды *II*. Когда микроскоп точно отфокусирован, этот световой пучок пересекается с фокальной плоскостью FF объектива (рис. 137) на границе раздела сред *I* и *II* — полоска Бекке сливается с границей. Если тубус микроскопа приподнять, фокальная плоскость объектива перейдет в положение F_1F_1 и будет пересекать световой пучок над средой *II* — полоска Бекке проектируется на вещество с большим преломлением. Когда тубус микроскопа опущен, световой пучок своим продолжением вниз пересекает фокальную плоскость F_2F_2 на стороне среды *I*, где и будет находиться в этот момент полоска Бекке.

Мы рассмотрели случай вертикального положения границы двух сред. Если эта граница наклонна, то во всех возможных на практике случаях вертикальные лучи отклоняются в сторону среды с большим показателем преломления. Вследствие этого полоска Бекке во всех случаях передвигается так же, как и при вертикальном положении границы. Все возможные положения границы показаны на рис. 138.

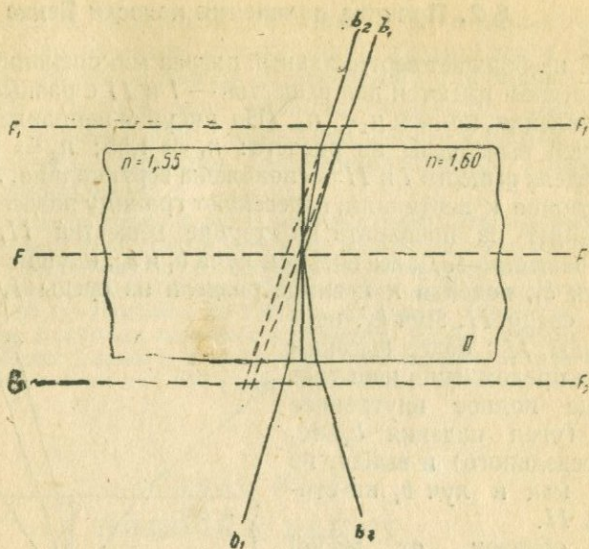


Рис. 137.

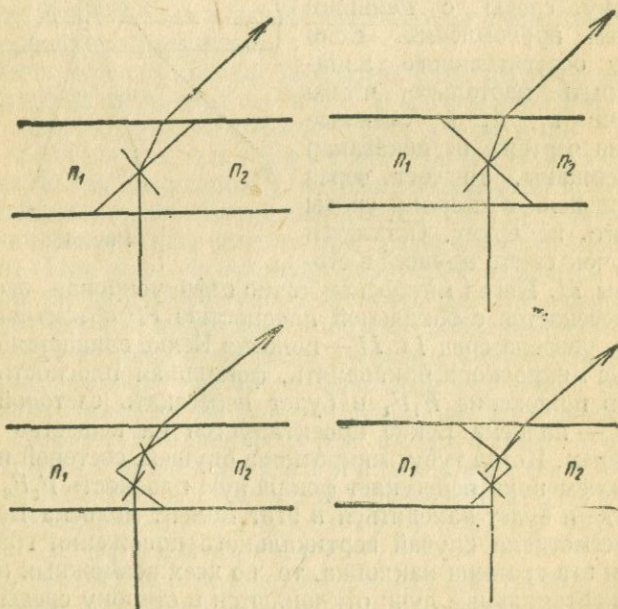


Рис. 138. Вертикальный луч во всех случаях косою положения границы отклоняется в сторону среды с более высоким показателем преломления ($n_2 > n_1$).

§ 3. Условия наблюдения полоски Бекке

Если объект освещать несимметричным косым пучком лучей, идущим со стороны более высокопреломляющей среды, то, как показывают специальные исследования, в некоторых случаях возможен обратный ход полоски Бекке. Чтобы избежать этого, надо выполнять изложенные ниже условия, обеспечивающие получение симметричного и не слишком расходящегося пучка лучей.

Положение зеркала. Для обеспечения правильного хода лучей зеркало должно быть расположено так, чтобы освещение поля было максимальным (см. гл. III, § 5). Если свет чересчур ярок, можно его ослабить, отодвигая осветитель или закрывая диафрагму. Ни в коем случае нельзя уменьшать освещения поля движением зеркала.

Положение объекта в поле зрения. Наблюдаемая граница должна находиться вблизи середины поля. В большинстве случаев, однако, хорошие результаты получаются и для зерен, расположенных на краю поля зрения.

Д и а ф р а г м а. Диафрагма должна быть закрыта настолько, чтобы отсутствовали косые лучи a_1 и a_2 (рис. 136). В противном случае могут получиться две полоски, движущиеся в противоположные стороны. Чем меньше разница между сравниваемыми показателями преломления, тем больше следует закрывать диафрагму.

У в е л и ч е н и е. Малые различия в показателях преломления улавливаются только сильными объективами. В прочих случаях можно пользоваться и средними. Слабые объективы дают отчетливые результаты только при значительной разнице показателей преломления.

С сильным объективом полоска видна при незначительном передвижении тубуса (действовать микрометренным винтом).¹ Чем больше глубина фокуса (чем слабее объектив), тем больше надо передвигать тубус, чтобы увидеть полоску. При слабом увеличении приходится для этого действовать кремальерой.

Х а р а к т е р г р а н и ц ы. Граница зерна, у которой наблюдается полоска Бекке, должна быть чистой, свободной от включений и пылинок. Чем меньше разница показателей преломления зерна и жидкости, тем больше мешают наблюдению посторонние частицы, приставшие к зерну. Полоска Бекке, идущая от границ этих частиц, может совершенно маскировать полоску, идущую от границ исследуемого зерна.

¹ Микрометренный винт с горизонтальной головкой опускает тубус при вращении по часовой стрелке и поднимает тубус при обратном вращении. Микрометренный винт с вертикальной головкой перемещает тубус в ту же сторону, как и кремальера при аналогичном вращении. В некоторых микроскопах тубус, дойдя до крайнего верхнего или нижнего положения при дальнейшем вращении микрометренного винта в ту же сторону, меняет свое движение на обратное. В таких микроскопах, во избежание ошибок при наблюдении полоски Бекке, надо всегда устанавливать микрометренный винт так, чтобы он передвигал тубус аналогично кремальере.

В этом случае, а также когда край зерна чересчур толстый, иногда вместо полоски Бекке можно пользоваться другими явлениями (осветление и потемнение), о которых будет сказано ниже.

§ 4. Чувствительность метода

Эмпирически установлено, что при разнице показателей преломления сравниваемых сред около 0,001 полоска Бекке видна еще довольно отчетливо. Большой точности обычно и не требуется. Впрочем, 0,001—еще не предел точности метода. Опытный работник, применяя монохроматический свет, может уловить полоску Бекке и при разнице в 0,0005. Имеются указания, что при некоторых условиях может быть замечена и разница в 0,0002.

Очевидно, чем меньше эта разница, тем больше предельный угол полного внутреннего отражения на границе сравниваемых сред, тем больше, следовательно, надо сузить диафрагму осветительного аппарата, чтобы все лучи, идущие со стороны среды с высоким показателем преломления, испытали на границе полное внутреннее отражение и образовали пучок, обуславливающий появление полоски Бекке.

Райт для ряда случаев вычислил величину максимального угла растворения конуса лучей, выходящих из осветительного аппарата, при котором указанное условие еще соблюдается. Так, при $n_1 = 1,550$ и $n_2 = 1,555$ ($n_2 - n_1 = 0,005$) все лучи, идущие со стороны среды с более высоким показателем преломления, испытают полное внутреннее отражение, если ширина пучка лучей, выходящих из осветительного аппарата, не превышает $14^\circ 16'$ (т. е. крайние лучи пучка делают с нормалью к препарату $7^\circ 8'$). При $n_1 = 1,550$ и $n_2 = 1,551$ ($n_2 - n_1 = 0,001$) ширина светового пучка не должна превышать $6^\circ 24'$ (угол между крайними лучами и нормалью — $3^\circ 12'$). При $n_1 = 1,700$ и $n_2 = 1,701$ ($n_2 - n_1 = 0,001$) ширина светового пучка также должна быть около 6° . Такая ширина пучка, обуславливающая отчетливую видимость полоски Бекке при разнице показателей преломления сред всего в 0,001, без труда достигается закрыванием диафрагмы.

§ 5. Цветные полосы

Если наблюдение ведется в монохроматическом свете, то в случае равенства показателей преломления зерна и жидкости полоска Бекке не появляется, контуры зерна пропадают, и если зерно бесцветно, оно становится невидимым. В белом свете, вследствие разной дисперсии показателей преломления исследуемого тела и жидкости, будет наблюдаться иной эффект.

Как было указано (введение, § 5), показатели преломления данной среды для длинных волн меньше, чем для коротких. Если отложить по оси абсцисс длины волн света, а по оси ординат — показатели преломления, то график, выражающий изменение n с возрастанием λ , будет иметь вид полого падающей кривой (рис. 139).

Дисперсия (разница показателей преломления для длинных и коротких волн) у жидких органических соединений, какими являются иммерсионные жидкости, больше чем у большинства твердых тел. Поэтому соответствующая кривая для иммерсионной жидкости будет более крутой, чем для исследуемого твердого тела.

Пусть достигнуто равенство показателей преломления жидкости и зерна для средней части спектра (для желтых или зеленых лучей). Тогда, как можно видеть из рис. 139, *b*, для коротких волн (фиолетовых и синих) показатель преломления зерна будет меньше, чем жидкости, а для длинных волн (красных), наоборот, показатель зерна будет больше, чем жидкости. Вследствие этого пучки красных и синих лучей после выхода из препарата будут лежать по разные стороны границы между

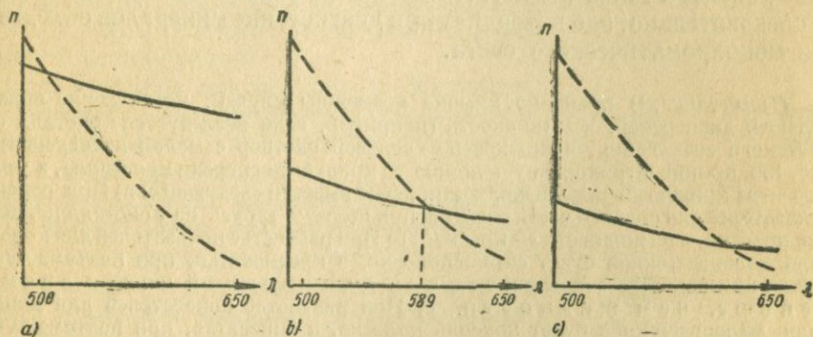


Рис. 139. *a*) n зерна $= n$ жидкости для коротких λ ; для всех остальных λ , n зерна $> n$ жидкости; *b*) n зерна $= n$ жидкости для средней части спектра. Для коротких λ , n зерна $< n$ жидкости; для длинных — n зерна $> n$ жидкости; *c*) n зерна $= n$ жидкости для длинных λ . Для остальных λ — n зерна $< n$ жидкости. (Сплошная линия — кривая дисперсии зерна; штриховая линия — кривая дисперсии жидкости.)

зерном и жидкостью. При подъеме тубуса на зерно пойдет красно-оранжевая полоска, а на жидкость — фиолетово-синяя. При опускании тубуса движение полосок будет обратное. Это явление свидетельствует о том, что в пределах точности работы с белым светом достигнуто равенство показателей преломления зерна и жидкости для средней части спектра.

Положим теперь, что равенство показателей имеет место для синего света. Для всех более длинных волн показатель преломления зерна будет больше, чем жидкости (рис. 139, *a*). Фиолетовые и синие лучи пройдут без или почти без преломления, а все остальные дадут избыточный пучок на стороне зерна. При подъеме тубуса на зерно пойдет бледная красноватая полоска, синеватая же будет стоять неподвижно на контуре зерна или слегка сместится в противоположную сторону. При опускании тубуса красноватая полоска перейдет на жидкость, а синеватая останется почти на месте. Это явление показывает, что д л я

средней части спектра показатель преломления зерна больше, чем жидкости.

Наконец, если показатели преломления равны для красных волн, то для всех более коротких волн показатель преломления зерна меньше, чем жидкости (рис. 139, с). Очевидно, что в этом случае красноватая полоска будет мало смещаться с контура зерна, а бледная синеватая будет при подъеме тубуса переходить на жидкость, а при опускании — на зерно. Этот эффект указывает, что для средней части спектра показатель преломления зерна меньше, чем жидкости.

Таким образом сравнение подвижности цветных полосок позволяет определять в белом свете показатель преломления зерна для средней части спектра лишь немногим менее точно, чем в монохроматическом, и, следовательно, оно позволяет при диагностике минералов обходиться без монохроматического света.

Примечание. В практике химика возможны случаи, когда зерно обладает большей дисперсией, чем жидкость (например, если исследуется кристалл органического соединения, а жидкость — солевой раствор с малой дисперсией). Из рис. 139, приняв штрихованную линию за кривую дисперсии кристалла, а сплошную — за кривую дисперсии жидкости, легко вывести следующее: а) При равенстве показателей для средней части спектра, при подъеме тубуса на кристалл пойдет синяя полоска, а на жидкость — красная. б) При равенстве показателей для коротких волн малоподвижной будет синяя полоска, а красноватая, при подъеме тубуса, пойдет на жидкость — n кристалла для средней части спектра меньше, чем жидкости. в) При равенстве показателей для длинных волн малоподвижной будет красная полоска, а синеватая, при подъеме тубуса, пойдет на кристалл — n кристалла для средней части спектра больше, чем жидкости.

§ 6. Посветление и потемнение зерна

Если размеры зерна не очень велики, а также если толщина зерна не слишком мала по сравнению с его диаметром, при перемещении тубуса, кроме полоски Бекке, можно наблюдать следующее явление. При переходе полоски на зерно оно все целиком становится несколько светлее, а при уходе полоски с него — несколько темнее, чем при точной установке на фокус. Этим явлением можно пользоваться, когда почему-либо сама полоска плохо видна, например в случае мелких или слегка загрязненных по краям зерен. (В частности этот эффект наблюдается отчетливее, чем полоска Бекке, при определении карбонатов по их показателю n_0 , когда показатель жидкости довольно близок к показателю минерала, а форма зерен — мелкие ромбоэдры.)

Когда показатели зерна и жидкости для средней части спектра равны, зерно при подъеме тубуса желтеет, а при опускании — синее (это явление имеет место и при приблизительном равенстве показателей).

§ 7. Видоизменение полоски Бекке для очень малых зерен

В случае очень малых зерен, величина которых находится почти у предела разрешающей силы микроскопа (один микрон и меньше), точная фокусировка затруднительна. Явление, по которому можно судить — больше или меньше показатель преломления зерна, чем жидкости, — здесь видоизменяется. А именно: если зернышко достаточно мало, то можно, фокусируя, добиться того, что в некоторый момент все оно станет темным (как бы непрозрачным). Если показатель преломления зерна (n) больше, чем показатель преломления жидкости (n_1), то при поднятии тубуса от этого положения зерно целиком просветляется, а при опускании появляется светлая каемка, которая с краев зерна идет на жидкость; при этом размеры темного зерна как бы несколько уменьшаются.

Если n зерна меньше, чем n_1 жидкости, то, наоборот, темное зернышко просветляется при опускании тубуса, а светлая каемка появляется при поднятии.

Схематически это показано на рис. 140.

Пользуясь этим явлением, можно с уверенностью определять показатели преломления зерен до $0,5 \mu$ в поперечнике, если применять сильные объективы (№ 7 и иммерсионный 1/12).

Этим же способом можно пользоваться и при работе с меньшими увеличениями (например, объектив № 3 для зерен размером около $3-8 \mu$, которые при данном увеличении кажутся почти точками). Описанное явление в этом случае протекает почти так же. Единственное отличие заключается в том, что в случаях Ic и IIa (при расплывании белой каемки) не уменьшаются видимые размеры зерна.¹

При размерах крупинки около $0,3 \mu$ определение в белом свете уже невозможно при любом увеличении. Фокусируя, в некоторый момент видим крупинку совершенно темной. При поднятии и опускании тубуса от этого положения эффект получается один и тот же: зерно просветляется, и его контуры расплываются.

Возможно, что здесь мы подошли к минимальным размерам, при которых вообще может быть определен показатель преломления у отдельного изолированного зерна, так как размеры зерна в данном случае уже равны половине средней длины световой волны.

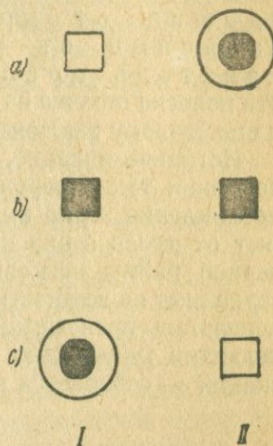


Рис. 140. a, b, c — изменение вида крупинки по мере опускания тубуса микроскопа; I — n зерна $> n_1$ жидкости; II — n зерна $< n_1$ жидкости. (Ic и IIa — крупинка окружена расплывающейся белой каймой.)

¹ Уменьшение видимых размеров частиц величины около 1μ , т. е. немного превышающих длину световой волны, не наблюдаемое для более крупных зерен, зависит, по видимому, от дифракции света.

§ 8. Видоизменение полоски Бекке в случае очень большой разницы показателей преломления

Когда показатель преломления зерна очень сильно отличается от показателя жидкости, зерно имеет на своих краях более или менее широкую черную кайму. Эта кайма получается вследствие сильного изменения направления световых лучей, проходящих у краев зерна, и наблюдается как при очень высоком, так и при очень низком показателе преломления зерна относительно жидкости. Если зерно имеет черную кайму, то при подъеме тубуса всегда наблюдается тонкая светлая полоска, идущая от краев зерна на жидкость независимо от того, больше или меньше показатель преломления зерна, чем жидкости. Эта полоска похожа на полоску Бекке, и наблюдение ее может привести к ошибочному заключению о показателе преломления зерна.

Истинное явление, по которому можно судить о показателе преломления таких зерен, заключается в следующем: если показатель преломления зерна выше, чем жидкости, то при подъеме тубуса весь свет от краев зерна как бы собирается к центру, при этом ширина черной каймы несколько увеличится. При опускании тубуса свет с зерна идет на жидкость, как бы переливаясь через черную кайму. Если показатель преломления зерна ниже, чем жидкости, то, наоборот, при поднятии тубуса свет переливается с зерна на жидкость, а при опускании — собирается к центру зерна.

Глава XIX

ЭФФЕКТ КОСОГО ОСВЕЩЕНИЯ

§ 1. Получение косоого освещения

Применение эффекта косоого освещения для целей иммерсионного метода описывал Машке (1872, 1880). В 1885 г. Экснер описывает его применение для определения показателей преломления различных тканей организмов. В 1892 г. Бекке мельком упоминает об этом эффекте. Широкое применение его начинается после опубликования работ Шредер ван-дер-Колька (1899, 1900), и сам эффект получает название «эффекта Шредер ван-дер-Колька».

Чтобы наблюдать этот эффект, надо на пути лучей в микроскопе ввести заслонку таким образом, чтобы была изъята часть лучей, освещающих объект, и пучок света оказался несимметричным. Для этой цели нельзя вводить заслонку в любом месте по ходу лучей. Например, если введем заслонку непосредственно над осветителем, симметричность пучка не нарушится, так как здесь через каждую точку пространства проходят лучи в различных направлениях. Поэтому эффект от вдвигания заслонки выразится здесь главным образом в уменьшении общей интенсивности светового пучка. Несимметричный пучок полу-

чится, если вводить заслонку вблизи одного из тех мест, где находятся точки схождения лучей, распространявшихся в исследуемом объекте параллельно друг другу.

Одним из таких мест, как показано выше, является верхняя фокальная плоскость объектива (где получается коноскопическая фигура). Чтобы ввести сюда заслонку, можно использовать прорез для гипсовой пластинки. Другое такое место находится несколько выше окуляра. Сюда вводил заслонку Экснер (при этом приходится несколько отдалять глаз от окуляра). Наконец, можно, как это делал Шредер ван-дер-Кольк, вводить заслонку между зеркалом и поляризатором. При этом, однако, не во всех микроскопах эффект получается достаточно отчетливым. Чтобы эффект косо́го освещения был выражен более резко, иногда применяют метод двойной диафрагмы — вводят одну заслонку под столик и одновременно вторую в прорез для гипсовой пластинки.

Мы считаем наиболее удобным в работе простой и в то же время дающий очень четкий эффект способ получения косо́го освещения, предложенный профессором Ленинградского университета О. М. Аншелесом (1925). Согласно этому способу в качестве заслонки применяется оправа верхнего николя, который для этого вводится в тубус лишь настолько, чтобы своей оправой затенить часть поля зрения. Особенно хорошие результаты получаются с современными широкотубусными микроскопами, у которых анализатор расположен в нижней части тубуса и снабжен широкой оправой. Несколько хуже эффект у старых микроскопов с коротким высоко посаженным анализатором, имеющим узкую оправу. Но и в этом случае пользоваться оправой николя значительно удобнее и проще, чем специальной заслонкой.

Все дальнейшее изложение составлено применительно к способу Аншелеса.

§ 2. Схема эффекта косо́го освещения ¹

Исследуемое зерно обычно в большей или меньшей степени приближается по форме к двояковыпуклой линзе. Такая линза будет собирающей, если ее показатель преломления выше, чем окружающей жидкости (рис. 141, I). В обратном случае (n зерна $<$ n жидкости) линза эта будет рассеивающей (рис. 141, II).

Введем заслонку на пути лучей на некоторой высоте над зерном. В первом случае (n зерна $>$ n жидкости) будут погашены лучи, идущие от противоположного заслонке края зерна. Во втором случае (n зерна $<$ $<$ n жидкости) погасятся лучи, идущие от обращенного к заслонке края зерна. В результате на той или другой стороне зерна появится тень. Учтя, что микроскоп даст перевернутое изображение предмета, получим видимое расположение тени на зерне относительно заслонки, изображенное на рис. 141, I и II (нижняя половина), т. е. е с л и

¹ Изложенное ниже есть лишь схема, позволяющая охватить явление без глубокого анализа его причин, но отнюдь не объяснение в строгом смысле слова.

показатель преломления зерна больше, чем жидкости, тень видна на крае зерна, обращенном к заслонке. Если же показатель

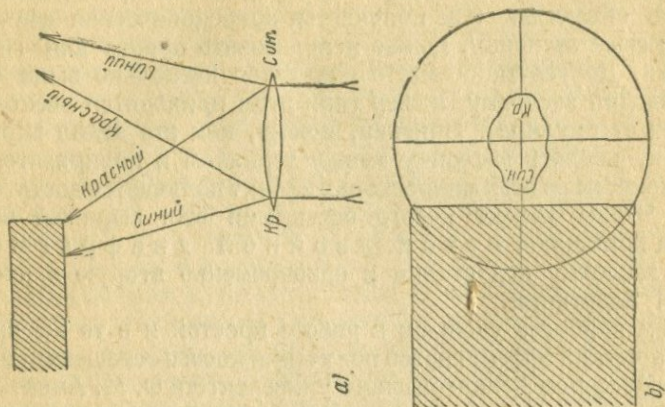


Рис. 142. n зерна близок к n жидкости. Цветная реакция при введении заслонки: а) — схема хода лучей; б) — видимое под микроскопом расположение окрасок на зерне.

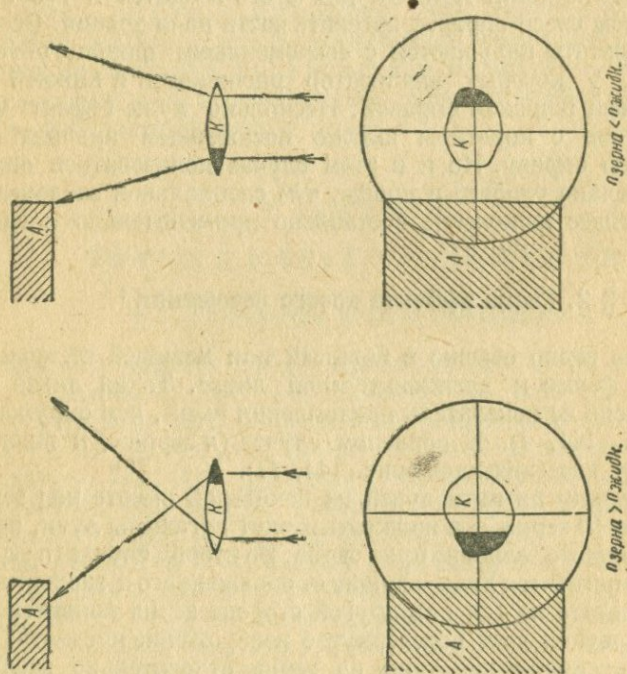


Рис. 141. Эффект косою освещения. Наверху — схемы хода лучей; внизу — видимое под микроскопом положение тени на зерне. А — заслонка (справа анализатора); К — зерно.

преломления зерна меньше, чем жидкости, тень видна на крае зерна, противоположном заслонке.

В случае, когда зерно и жидкость имеют близкие показатели преломления, имеет место так называемая цветная реакция, а именно: сторона зерна, обращенная к заслонке, кажется окрашенной в синий цвет, а противоположная сторона — в красный цвет.

Появление цветной реакции можно объяснить следующим. Пусть показатели преломления зерна и жидкости совпадают для некоторой длины волны в средней части спектра. Тогда, как мы видели выше (рис. 139, *b*), показатель преломления зерна для фиолетовых и синих лучей будет меньше, а для красных — больше, чем жидкости. Следовательно о, зерно для синих лучей будет служить рассеивающей линзой, а для красных, наоборот, — собирающей. Соответствующая схема хода лучей показана на рис. 142, *a*. Вводя заслонку, мы уничтожаем синие лучи, идущие от обращенного к заслонке края (край становится красноватым), и красные лучи от противоположного края (край становится синеватым). Вследствие того, что изображение в микроскопе перевернуто, видимый эффект будет обратным (рис. 142, *b*).

Цветная реакция появляется не только при полном равенстве показателей преломления зерна и жидкости для средней части спектра, но и при приблизительном равенстве. Чем больше дисперсия жидкости, тем при большей разнице в показателях наблюдается окрашивание зерна. От цветной реакции к реакции потемнения прилегающего к заслонке или противоположного края зерна существуют постепенные переходы. Так, если показатель преломления зерна лишь немного выше, чем жидкости, то прилегающий к заслонке темный край зерна имеет синеватый оттенок, а противоположный — светлый — желтоватый оттенок. Если же показатель преломления зерна немного ниже, чем жидкости, то прилегающий к заслонке светлый край является светлоголубым, а противоположный — темный — имеет коричневый оттенок.

Наличие этих переходов и появление цветной реакции уже при приблизительном равенстве показателей обуславливают меньшую чувствительность эффекта косо́го освещения по сравнению с полоской Бекке при работе в белом свете. Часто полоска Бекке позволяет вполне отчетливо установить: больше или меньше показатель преломления зерна, чем жидкости, в то время как косо́е освещение дает интенсивную цветную реакцию, свидетельствующую о якобы равенстве показателей. В монохроматическом свете чувствительность обоих методов почти одинакова.

§ 3. Условия наблюдения эффекта косо́го освещения

О с в е щ е н и е. Условия освещения в общем те же, что и для наблюдения полоски Бекке: правильное положение зеркала, дающее симметричный относительно оси микроскопа пучок лучей, и прикрытая для устранения косых лучей диафрагма. Симметричность пучка здесь имеет особенно большое значение, так как эффект косо́го освещения заключается именно в нарушении этой симметричности. При неправильном положении зеркала эффект (особенно цветная реакция) сильно ослабляется.

Увеличение. Эффект косо́го освещения наиболее отчетлив при средних увеличениях (объективы №№ 3 и 2). При объективе № 5 он выражен слабее, а при объективе № 7 почти не улавливается. Поэтому эффектом косо́го освещения неудобно пользоваться для очень мелких зерен, видимые размеры которых при средних увеличениях малы.

§ 4. Зависимость эффекта косо́го освещения от формы зерна

Эффект косо́го освещения выражен наиболее резко, когда форма зерна приближается к форме линзы (например, хорошо окатанные кварцевые песчинки). В этом случае, при неравенстве показателей зерна и жидкости, при вдвигании заслонки темнеет значительная часть площади зерна (четверть или треть). Противоположная часть зерна, такой же площади, при этом светлеет. Без изменения остается освещенность небольшой средней части зерна. Цветная реакция выражена в таких зернах также резко: синий и красный цвета окрашивают всю или почти всю поверхность зерна.

У ограненных кристаллов обычно средняя часть плоскопараллельна, а края утончаются и сходятся клином. В таких кристаллах явления потемнения и посветления приурочены главным образом к клиновидным краям, не затрагивая средней части зерна. При достаточной величине и, особенно, толщине кристалла эффект косо́го освещения наблюдается без затруднений.

Наиболее слабо выражен этот эффект у тонких пластинок, например в петрографических шлифах или у тонких листочков слюды в иммерсионном препарате. В этом случае потемнение и посветление приурочены к очень узким краевым зонам, которые чем тоньше пластинка, тем уже. Цветная реакция в этом случае также мало отчетлива.

§ 5. Области применения эффекта косо́го освещения

Из изложенного видно, что эффект косо́го освещения дает менее точные результаты, чем полоска Бекке при близости показателей зерна и жидкости. Кроме того, он не применим для мелких зерен и недостаточно отчетлив в очень тонких пластинках. Тем не менее, в ряде случаев он может быть предпочтен полоске Бекке. При продолжительной работе наблюдение полоски Бекке, связанное с постоянной дефокусировкой микроскопа, утомляет зрение. Поэтому, если зерна не слишком малы, работу следует вести при среднем увеличении и, наблюдая исследуемые зерна в разных жидкостях, пользоваться эффектом косо́го освещения до появления цветной реакции и лишь после этого переходить к наблюдению полоски Бекке.

Особенно удобно пользоваться эффектом косо́го освещения при исследовании смеси кристаллов разных веществ и при количественных подсчетах.

Например, легкая фракция песка состоит главным образом из кварца, кислых полевых шпатов и слюдистых минералов. Заполнив препарат жидкостью

с показателем преломления, близким к кварцевому (1,544—1,553) и введя заслонку, сразу можем установить, какие из находящихся в поле зрения зерен относятся к кварцу (цветная реакция), слюде (тень на стороне заслонки) и к полевым шпатам (тень на противоположной стороне) и подсчитать относительное содержание каждого из этих минералов.

Глава XX

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ИММЕРСИОННЫХ ПРЕПАРАТОВ

§ 1. Общие замечания

При иммерсионном исследовании материал наносится на предметное стекло в виде порошка. Если исследованию подвергается кусок горной породы или кристалл какого-либо вещества, он должен быть предварительно превращен в порошок. Для этого можно пользоваться фарфоровой или агатовой ступкой, минералогической наковальней или геологическим молотком. Маленький кусочек (около 1 мм в диаметре) исследуемого материала помещают в ступку или кладут на наковальню или на металлическую пластинку и раздробляют, надавливая сверху молоточком или иным подходящим предметом (черенком ножа, тыльной стороной зубила и пр.). Оптимальная крупность зерен для иммерсионного исследования 0,05—0,30 мм. Приготавливая препарат, надо следить, чтобы в него не попали отдельные более крупные зерна, затрудняющие работу. При крупности зерен меньше 0,05 мм индивидуальные черты отдельных минералов, облегчающие их опознавание, видны менее резко. Кроме того, затрудняется применение эффекта косо́го освещения и, что наиболее существенно, коноскопии. В тех случаях, когда материал обладает мелкокристаллическим сложением, его приходится дробить до крупности гораздо меньшей, чем оптимальная, так как необходимо, чтобы исследуемые зерна представляли собой не агрегаты, а монокристаллы.

Препарат не должен быть чересчур густым. Надо, чтобы зерна лежали изолированно, не касаясь одно другого.

Покровное стекло, которым накрывается препарат, не должно быть излишне большим. Чем меньше оно, тем быстрее производится наполнение препарата жидкостью и удаление ее. Наиболее удобный размер получается, если обычное покровное стекло диаметром 18 мм разрезать на 9 частей. (Ларсен рекомендует даже делить такое стекло на 16—25 частей.) При количественных подсчетах, применяемых в петрографии осадочных пород, когда приходится подсчитывать 600—700 зерен песка в иммерсионном препарате, диаметр препарата должен быть несколько больше. В этих случаях обычное покровное стекло делится только на четыре части.

§ 2. Приготовление препарата без закрепления зерен

Этот способ приготовления препарата наиболее прост. На предметное стекло помещают каплю иммерсионной жидкости (при помощи стеклянной пробки от флакончика с данной жидкостью). Обмакнув

в эту каплю кончик препаровальной иглы, захватывают иглой небольшое количество исследуемого вещества, равномерно распределяют его в капле жидкости на предметном стекле и накрывают покровным стеклом. Исследовать такой препарат приходится в большинстве случаев на прямо поставленном микроскопе, так как при наклоне столика зерна движутся в жидкости.

§ 3. Приготовление препарата с закреплением зерен

Простейший из относящихся сюда способов впервые описан проф. О. М. Аншелесом.¹ На предметное стекло при помощи стеклянной палочки помещают маленькую каплю воды. Влажным концом иглы захватывают небольшое количество исследуемого материала и равномерно распределяют его в этой капле.² Затем препарат высушивают осторожным нагреванием на спиртовке, после чего зерна оказываются приклеенными к предметному стеклу. (Высушивать следует до полного удаления влаги, иначе вокруг зерен остаются капельки воды, делающие невозможным исследование.) Если есть опасение, что вещество не выносит нагревания, препарат оставляют сохнуть в течение 10—15 минут на столе (лучше — вблизи горячей электрической лампочки), проверяя затем под микроскопом на отсутствие каемок влаги вокруг зерен. После этого на препарат накладывают покровное стекло, под которое затем подводится иммерсионная жидкость. Для этого при помощи стеклянной пробочки переносят каплю жидкости из флакона на предметное стекло и помещают около покровного. Капиллярные силы втянут жидкость под покровное стекло. Эту операцию повторяют до тех пор, пока все пространство под покровным стеклом не окажется заполненным жидкостью. При избытке жидкости покровное стекло может легко сместиться, если наклонить препарат. Во избежание этого лишнюю жидкость удаляют клочком фильтровальной бумаги.

В правильно приготовленном препарате зерна не двигаются, и покровное стекло не смещается при наклоне препарата.

Иногда для более прочного прикрепления зерен к предметному стеклу вместо чистой воды пользуются очень слабым раствором NaCl или желатина (предложение С. Г. Вишнякова). Пользуясь таким клеем, надо иметь в виду, что, если его концентрация недостаточно слаба, он при высыхании облекает тонкими пленками все зерна препарата. В этом случае определение показателей преломления зерен становится невозможным, так как нельзя наблюдать непосредственного контакта жидкости с зерном. Эффект косо́го освещения и полоска Бекке в этом случае имеют место на контактах жидкости с пленкой и пленки с зерном.

При массовой работе, особенно при количественных подсчетах, удобно иметь предметные стекла, покрытые слоем желатина (предло-

¹ Геологический вестник, № 2, 1928, стр. 56.

² На чистом стекле капля располагается тонким слоем. В этом случае легко добиться равномерного распределения материала. Если стекло жирное, капля сохраняет сферическую форму, и порошок отбрасывается к ее краям. Жирные стекла надо мыть в теплой мыльной воде.

жение В. Т. Белоусовой). Для этого стекла погружаются в однопроцентный раствор желатина и высушиваются. Чтобы приготовить препарат, на такое стекло помещают немного сухого порошка и равномерно распределяют его, постукивая по стеклу. После этого достаточно слегка подышать на препарат, чтобы зерна приклеились к стеклу. При излишне толстом слое желатина и если при дыхании препарат слишком увлажняется, так же как и в предыдущем случае, возможно образование на зернах желатиновых пленок, препятствующих исследованию.

§ 4. Смена жидкостей в препарате

Если готовить препараты простейшим способом, без закрепления зерен, то при определении показателей преломления для каждой жидкости приходится готовить особый препарат.¹ В ряде случаев это оказывается невозможным или неудобным. А именно: 1) если исследуемого вещества мало и его нехватит на несколько препаратов (например, тяжелая фракция песка, получаемая иногда в ничтожных количествах); 2) если интересующее нас вещество содержится в исследуемом порошке в ничтожной концентрации (в этом случае, сделав второй препарат из данного порошка, мы рискуем не найти в нем зерен нужного нам вещества); 3) если исследуемое вещество оптически анизотропно, то, чтобы измерить главные показатели преломления, надо найти определенный разрез (коноскопически). Приготовляя для каждой жидкости новый препарат, приходится всякий раз заново искать нужный разрез.

Поэтому мы рекомендуем пользоваться препаратами с незакрепленными зернами только в том случае, когда, во-первых, исследуемое вещество имеется в достаточном количестве и, во-вторых, не нужно искать определенного разреза для определения показателей преломления. Во всех других случаях следует приклеивать зерна к предметному стеклу. При аккуратной работе можно, как указано выше, пользоваться в качестве клея чистой водой, не прибегая к раствору поваренной соли или желатина, особенно если зерна достаточно мелки.

Закрепление зерен позволяет вести все исследование с одним препаратом, меняя в нем жидкости.² Смена жидкости производится следующим способом. Найдя нужное зерно и поместив его на крест нитей, ставят столик микроскопа горизонтально или с небольшим наклоном и приподнимают тубус. После этого осторожно прикладывают к краю покровного стекла полоску фильтровальной бумаги, имеющую ровный край (не обрывок). Бумажку держат левой рукой и слегка прижимают к предметному стеклу препаративной иглой, которая

¹ Способ смены жидкостей в таком препарате, связанный, однако, с нарушением положения зерен и отнимающий сравнительно много времени, изложен в § 6 этой главы.

² Метод смены жидкостей в одном препарате впервые был предложен и применен проф. О. М. Аншелесом (Геологический вестник, № 2, 1928, стр. 56).

находится в правой руке (рис. 143). Бумажка, подойдя к краю покровного стекла, приходит в соприкосновение с жидкостью и вытягивает ее из препарата. При большом покровном стекле эту операцию повторяют 2—3 раза. Удалив жидкость, берут в левую руку флакончик с новой жидкостью и, держа его над препаратом, правой рукой, при помощи пробки от этого флакона, наполняют препарат новой жидкостью, как описано на стр. 220. Если эти манипуляции произведены достаточно аккуратно, выбранное ранее зерно после смены жидкости продолжает оставаться на кресте нитей. Смена жидкости у опытного работника занимает около одной минуты.¹

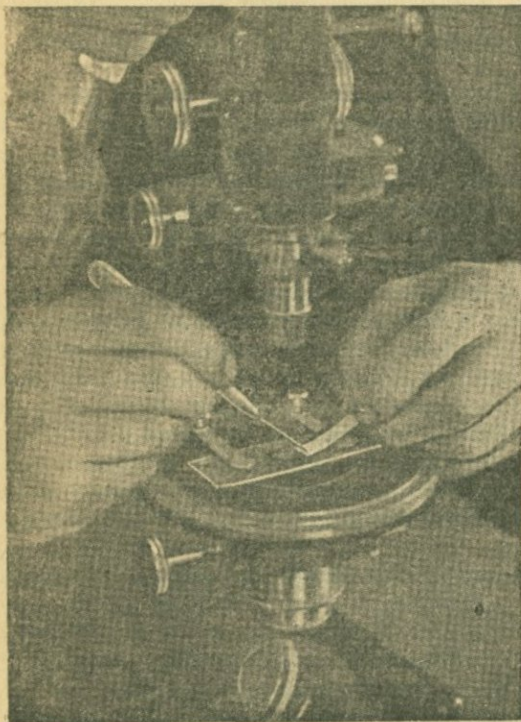


Рис. 143. Удаление иммерсионной жидкости из препарата на столике микроскопа.

Этот простой и быстрый метод до сих пор применяют только работники, обучавшиеся у проф. О. М. Аншелеса и его учеников. Можно думать, что многоимон вообще неизвестен.

В качестве иллюстрации можно упомянуть, что в *The American Mineralogist* за 1934 г. напечатана статья, автор которой, не подозревая о возможности смены жидкостей, предлагает переносить исследуемое зерно из препарата в препарат и подробно описывает ряд разработанных им для этой цели приспособлений.

Если исследуемый материал состоит из зерен малой крупности ($< 0,05$ мм), то между предметным и покровным стеклами получается слишком узкий просвет, из которого жидкость вытягивается с трудом. В таких случаях О. М. Аншелес рекомендует, чтобы увеличить просвет, примешивать к исследуемому материалу осколки покровных стекол. При работе с тонкозернистым материалом можно применять для удаления жидкости также следующую

прием: подведя фильтровальную бумажку к краю покровного стекла, подводят под противоположный край его кончик препаративальной иглы и ставят стекло вертикально. При этом почти вся жидкость всасывается фильтровальной бумагой. Затем покровное стекло

¹ Этот простой и быстрый метод до сих пор применяют только работники, обучавшиеся у проф. О. М. Аншелеса и его учеников. Можно думать, что многоимон вообще неизвестен.

В качестве иллюстрации можно упомянуть, что в *The American Mineralogist* за 1934 г. напечатана статья, автор которой, не подозревая о возможности смены жидкостей, предлагает переносить исследуемое зерно из препарата в препарат и подробно описывает ряд разработанных им для этой цели приспособлений.

опрокидывается на бумажку, удаляется с препарата и тщательно протирается, после чего снова накладывается на препарат, который наполняется новой жидкостью.

§ 5. Возможная погрешность при смене жидкости и пути ее устранения

Извлечение жидкости из препарата никогда не бывает полным. Всегда вокруг зерен остаются каемки старой жидкости, которая смешивается с новой и изменяет ее показатель преломления. Возникает вопрос: насколько это изменение существенно и не может ли оно вести к серьезным ошибкам?

Допустим, что после удаления в препарате осталось 5% жидкости (а практически в большинстве случаев в препарате остается гораздо меньше жидкости, около 1—2%). Обозначим показатель преломления удаленной жидкости через a . Введя в препарат новую жидкость с показателем b , мы получим смесь, показатель преломления которой приблизительно равен $\frac{19}{20}b + \frac{1}{20}a$ и отличается от величины b на $\frac{b-a}{20}$.

Приступая к определению показателя преломления, обычно сначала берут жидкости, довольно значительно отличающиеся друг от друга по показателю, чтобы быстрее найти тот интервал, в пределах которого лежит показатель преломления исследуемого зерна. Примем поэтому для начала $b-a=0,060$. При этом истинный показатель преломления смеси будет отличаться от b всего на 0,003, т. е. на величину, почти лежащую в пределах точности метода. Если при этом показатель преломления зерна заметно отличается от показателя преломления смеси, можно быть уверенным, что он почти так же сильно и в ту же сторону отличается и от показателя b . Найдя интервал, в котором лежит показатель данного зерна, мы берем жидкости, все меньше отличающиеся друг от друга по показателю преломления и, наконец, переходим к интервалам порядка 0,006—0,010, при которых погрешность от смешения жидкостей не превышает 0,0003—0,0005, т. е. лежит вполне в пределах возможной ошибки самого иммерсионного метода.

При особо ответственных измерениях можно, подобрав жидкость, показатель которой равен показателю зерна, удалить эту жидкость и снова наполнить препарат ею же. При этом разница между показателем преломления смеси жидкостей в препарате и последней жидкости будет составлять всего $\frac{b-a}{400}$. Если $b-a$ равно 0,006—0,010,

погрешность будет лежать в пределах 0,000015—0,000025, т. е. представлять совершенно неощутимую величину. Следует отметить, что в огромном большинстве случаев эта операция оказывается излишней: удаление последней жидкости и повторное наполнение препарата такой же жидкостью не ведет к изменению полученного результата.

Таким образом, если к показателю преломления зерна мы подходим, постепенно уменьшая интервалы между показателями жидко-

стей, можно совершенно не считаться с ошибкой, происходящей от неполного удаления жидкости из препарата.

Недоразумения возможны, если в самом начале определения, взяв жидкость с показателем b , сильно отличающимся от показателя предыдущей жидкости a , мы обнаруживаем близость показателя преломления зерна к показателю получившейся смеси. При этом возможны следующие случаи:

I. $b > a$ (очевидно, n смеси $< b$). 1) n зерна $< n$ смеси. При этом n зерна заведомо меньше b . 2) n зерна $\approx n$ смеси. При этом n зерна или равно, или очень немного меньше b . Для проверки удаляем жидкость и снова наполняем препарат жидкостью b . 3) n зерна очень немного больше, чем n смеси. При этом n зерна может быть либо равен b , либо незначительно отличаться от него в ту или иную сторону. Для проверки поступаем, как в предыдущем случае.

II. $b < a$ (n смеси $> b$). 1) n зерна $> n$ смеси. При этом n зерна заведомо больше b . 2) n зерна $\approx n$ смеси. При этом n зерна или равно, или незначительно больше b . Для проверки удаляем жидкость из препарата и снова наполняем его жидкостью b . 3) n зерна незначительно меньше, чем n смеси. При этом n зерна либо равен b , либо незначительно отличается от него в ту или иную сторону. Проверка — как в предыдущем случае.

Все изложенное выше относительно возможности смены жидкостей в препарате без вреда для точности окончательного результата в полной мере справедливо для жидкостей не слишком густых и легко смешивающихся друг с другом. Во многих иммерсионных наборах интервал 1,48—1,51 представлен смесями касторового и кедрового масел. Жидкости эти благодаря своей густоте плохо отсасываются из-под покровного стекла и остаются вокруг зерен в большем количестве, чем другие. После введения новой жидкости, особенно если эта новая жидкость также густая, не получается сразу однородная смесь, и вокруг зерен сохраняются зоны с показателем преломления, близким к показателю старой жидкости, что может привести к серьезным ошибкам. Во избежание этого, работая в интервале густых жидкостей, следует после каждой жидкости промывать препарат каким-либо летучим органическим растворителем (спирт, эфир, ксилол и пр.). Капля растворителя вводится под покровное стекло и сейчас же отсасывается фильтровальной бумажкой. Если после испарения следов растворителя вокруг зерен исчезнут оболочки густой жидкости, в препарат можно вводить следующую жидкость.

§ 6. Смена жидкости в препарате с незакрепленными зернами

Если почему-либо требуется сменить жидкость в таком препарате, можно воспользоваться способом, рекомендуемым В. П. Петровым (личное сообщение). Для этого сначала с препарата снимается покровное стекло, как описано на стр. 222, после чего с помощью поставленной на ребро полоски фильтровальной бумажки порошок собирается в кучку.

При этом большая часть жидкости впитывается бумажкой. Для удаления остатков жидкости порошок смачивается спиртом или ксилолом и снова обрабатывается фильтровальной бумажкой. После испарения следов спирта порошок смачивается каплей новой иммерсионной жидкости и накрывается покровным стеклом. Нажимая на покровное стекло тупым концом карандаша или спичкой, снова добиваются равномерного распределения материала в препарате.

§ 7. Некоторые особенности исследования веществ, растворимых в воде

Препараты из веществ, растворимых в воде, обычно готовятся простейшим способом без закрепления зерен. Г. Б. Бокий указывает, что можно делать из таких веществ и препараты с закреплением зерен, применяя в качестве клея летучие органические жидкости, например бензин, спирт или эфир.

Для полноты исследования во многих случаях полезно, помимо таких препаратов, готовить препараты путем кристаллизации, нанося каплю раствора исследуемого вещества на предметное стекло и высушивая ее без нагревания. Кристаллизация обычно начинается на краях капли, чтобы она шла равномерно, возникшие на краях зародыши переносятся иглой в середину капли. Когда кристаллы достигнут нужной величины, избыток раствора удаляется фильтровальной бумажкой, после чего препарат оставляют в покое до полного высыхания. Если исследуемое вещество гигроскопично, вокруг зерен остаются невысыхающие капли влаги. Во многих случаях удается избавиться от влаги, помещая на препарат каплю чистого спирта и удаляя ее фильтровальной бумагой или слабым нагреванием. Эту операцию иногда приходится повторять 2—3 раза.

Приготавливая препарат путем кристаллизации, надо иметь в виду, что при этом могут получиться соединения с иным содержанием воды, чем исследуемое вещество. Некоторые двойные соли разлагаются (например, карналлит — $\text{КСl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ распадается на хлористый калий и хлористый магний).

Глава XXI

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ СПЛАВОВ

§ 1. Приготовление препаратов

Для приготовления препаратов со сплавами удобно иметь электроплитку с регулируемым нагревом, но можно пользоваться и обыкновенной спиртовкой. Простейший способ приготовления препарата состоит в следующем. Маленькое количество сплава (около 1 мм³) помещается на предметное стекло и осторожно нагревается над слабым

пламенем спиртовки. Сплав пиперина с иодидами нагревают до тех пор, пока кусочек сплава не начнет расплываться. Сплав серы с селеном нагревают до появления легкого дымка. При этом жидкий сплав становится темным и несколько загустевает. Чем больше содержание селена, тем выше температура плавления сплава. Следует остерегаться как излишнего перегревания, так и недогревания сплава. Если сплав недостаточно прогрет, то при большом содержании серы он после охлаждения очень быстро закристаллизовывается. Сплавы с большим содержанием селена при недогреве остаются густыми, что мешает получить достаточно тонкий и прозрачный препарат. В перегретом сплаве появляются пузыри и неоднородности.

После нагревания препарат снимают с огня и погружают в сплав несколько заранее приготовленных зернышек исследуемого вещества (тонкий порошок вносится в сплав при помощи препаровальной иглы). Затем быстро накрывают маленьким покровным стеклом, которое прижимают карандашом или спичкой, чтобы сплав растекся возможно более тонким слоем.

Если исследуемое вещество не боится нагревания, лучше заранее распределить порошок на предметном стекле и нагревать его вместе со сплавом. Можно даже сделать обычный препарат с закреплением зерен, изучить его в иммерсионной жидкости, а затем, удалив жидкость и сняв покровное стекло, приготовить препарат со сплавом, в котором сохранится то же взаимное расположение зерен, которое наблюдалось в жидкости.

Большие трудности возникают при исследовании тонкозернистых сред с крупностью частиц порядка 1 микрона, так как сплавы обычно не являются оптически пустыми и сами содержат большое количество частиц такой крупности. Чтобы отличить частицы исследуемого вещества от частиц сплава, можно применить следующий способ. Делают из исследуемого вещества препарат с закреплением зерен, причем равномерно распределяют вещество по площади, превышающей площадь покровного стекла. Затем при помощи спички или иглы проводят в препарате ряд линий. Расплавив после этого на препарате сплав и покрыв его покровным стеклом, просматривают препарат под микроскопом при среднем увеличении. По хорошо видимым на непокрытой части препарата прочерченным, освобожденным от частиц линиям находят продолжение этих линий в сплаве под покровным стеклом и, сменив увеличение на сильное, определяют показатель преломления частиц, лежащих на краях этих линий.

При работе с малопрозрачными сплавами надо стремиться к тому, чтобы препарат имел возможно меньшую толщину. Толщина зерен в 0,20—0,15 мм для сплавов с высоким содержанием селена оказывается слишком большой. Такие зерна приходится растирать в более тонкий порошок.

§ 2. Влияние окраски сплавов

Окрашенность сплавов несколько изменяет наблюдение в кристаллах интерференционных явлений. Пипериновые сплавы при большом содержании иодидов пропускают только желтую и красную части

спектра. Сплавы серы с селеном при высоком содержании селена — только красную. Такие сплавы служат как бы светофильтрами для погруженных в них зерен. Поэтому дисперсия направлений колебаний в кристаллах заметна в сплавах гораздо слабее, чем в жидкостях. Дисперсия оптических осей, наблюдаемая в сходящемся свете, почти совершенно пропадает даже в слабоокрашенных сплавах и у минералов, у которых она резко выражена (например, у титанита).

В сплавах, богатых селеном, даже при большой близости показателей преломления зерна и сплава не наблюдается ни цветного окрашивания при косом освещении, ни цветных полосок Бекке. Наоборот, в светлых пипериновых сплавах, благодаря большой дисперсии пиперина, цветные полосы имеют место и при значительной разнице между показателями преломления зерна и сплава. Поэтому здесь желательнее пользоваться светофильтрами. Особенно удобна пластинка Меланхолина, представляющая собой 6 маленьких желатиновых светофильтров, смонтированных в общей металлической оправе



Рис. 144. Пластинка Меланхолина со светофильтрами (в натуральную величину).

(рис. 144). К пластинке прилагается паспорт с указанием областей спектра, пропускаемых отдельными светофильтрами. Эту пластинку можно вставлять в микроскоп на место гипсовой пластинки. К сожалению, почти всегда эти светофильтры недостаточно плоскопараллельны и заметно искажают изображение. Поэтому лучше всего, несколько опустив осветительный аппарат, ввести пластинку под столик микроскопа и затем, подняв осветительный аппарат, прижать пластинку к столику.

Показатель преломления, определяемый в густоокрашенных сплавах при белом свете, близок к показателю преломления для света лития. Применение светофильтров, кроме красных, для таких сплавов почти невозможно.

§ 3. Точность работы со сплавами

Точность определения показателей преломления при помощи сплавов понижается следующими обстоятельствами: 1. Затруднительность периодической проверки показателей преломления сплавов. 2. Возможность изменения показателя преломления сплава в процессе приготовления препарата. Есть указания, что пипериновые сплавы после сильного перегрева значительно понижают свой показатель преломления. 3. Возможность неоднородностей в сплаве в пределах препарата. Все это заставляет считать пределом достижимой точности при работе изложенными выше методами одну-две единицы второго знака

после запятой. В соответствии с этим наборы сплавов обычно составляются с интервалами в несколько единиц второго знака. Для рядовой работы, имеющей целью диагноз вещества, такой точности во многих случаях бывает достаточно, так как число минералов, обладающих высокими показателями преломления, сравнительно невелико.

Радикальное повышение точности работы возможно при наличии приспособлений, позволяющих измерять показатель преломления сплава в самом препарате, в непосредственном соседстве с исследуемым зерном. Таким приспособлением может служить интерференционный микрорефрактометр Лебедева-Заварицкого,¹ применение которого для определения показателей сплавов, особенно в комбинации с методом хроматической вариации (см. ниже), дает, насколько нам известно, хорошие результаты.

§ 4. Термическая вариация

Температурный коэффициент иммерсионных жидкостей составляет в среднем 0,0004—0,0005 на 1° С (см. стр. 190). Повышая температуру жидкости от комнатной до 60°, можно уменьшить ее показатель преломления примерно на 0,020. Показатели преломления твердых тел при таком нагревании остаются, в пределах точности иммерсионного метода, постоянными. Подобрав жидкость с показателем преломления несколько более высоким, чем у исследуемого вещества, можно путем нагревания добиться полного выравнивания показателей преломления зерна и жидкости. Если известны температура, при которой произошло выравнивание, и температурный коэффициент данной жидкости, можно простым вычислением определить показатель преломления исследуемого вещества.

Этот метод требует добавочного приспособления к микроскопу в виде нагревательного столика, снабженного термометром. Более надежные и точные результаты получаются, если, как в установке Эммонса (см. ниже метод двойной вариации), одновременно со столиком микроскопа до той же температуры доводятся призмы рефрактометра, между которыми заключена капля такой же жидкости, как в исследуемом препарате, или если столик микроскопа снабжен микрорефрактометром. В тот момент, когда показатель преломления жидкости становится равным показателю преломления исследуемого зерна, он измеряется непосредственно с помощью рефрактометра или микрорефрактометра. В этом случае отпадает необходимость точно замерять температуру опыта и пользоваться температурным коэффициентом.

Термической вариацией пользуются обычно в комбинации с хроматической.

¹ А. Н. Заварицкий, Интерференционный микрорефрактометр и его применение в минералогии и петрографии, ОНТИ, 1936. Л. Г. Кваша, Результаты испытания интерференционного микрорефрактометра, Зап. Мин. общ., ч. 67, вып. 2, 1938.

§ 5. Хроматическая вариация

В методе хроматической вариации используется то обстоятельство, что дисперсия показателей преломления иммерсионных сред значительно выше, чем минералов. Берется жидкость, показатель преломления которой в белом свете близок к показателю преломления исследуемого вещества. Затем, пользуясь монохроматором, получают равенство показателей преломления зерна и жидкости для света некоторой длины волны. Если известна кривая дисперсии данной жидкости, то по этой кривой находят показатель преломления вещества для данной длины волны. Чтобы получить показатель преломления исследуемого вещества для натрового света ($\lambda = 589 \text{ м}\mu$), берем одну

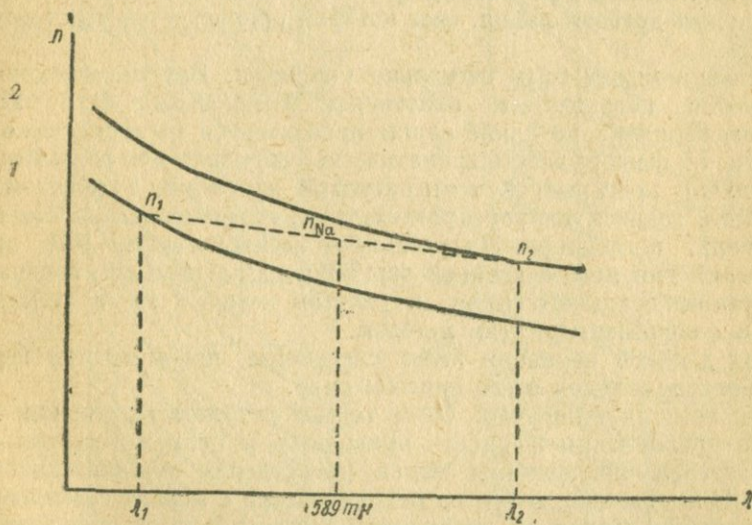


Рис. 145. Нахождение показателя преломления вещества для $\lambda = 589 \text{ м}\mu$ при хроматической вариации (1 и 2 — кривые дисперсии иммерсионных сред).

из соседних жидкостей иммерсионного набора и определяем таким же путем показатель преломления вещества для другой длины волны. По двум известным показателям преломления строим отрезок кривой дисперсии данного вещества и, интерполируя, находим показатель преломления для желаемой λ (рис. 145).

§ 6. Двойная вариация

Метод двойной вариации представляет комбинацию обоих вышеизложенных методов. Он позволяет в одной жидкости быстро и точно измерить показатели преломления вещества для света различных длин волн. Для этого берут жидкость, показатель преломления которой при

комнатной температуре немного выше, чем исследуемого вещества. При повышении температуры показатель преломления жидкости будет понижаться и совпадет с показателем преломления исследуемого вещества сначала в красной, затем в желтой, зеленой и, наконец, в синей части спектра (рис. 139). По полученным значениям показателей можно построить кривую дисперсии данного вещества.

Метод двойной вариации впервые был осуществлен Эммонсом, который пользовался микроскопом со столиком, обогреваемым теплой водой, и рефрактометром Аббе—Пульфриха с откидной призмой. Горячая и холодная вода поступает в смеситель, а затем по системе резиновых трубок проходит через столик микроскопа и призмы рефрактометра, между которыми находится такая же жидкость, что и в препарате. Столик и рефрактометр снабжены термометрами. Осветителем служит дуговая лампа, свет которой пропускается через монохроматор.

Установка может быть несколько упрощена. Вместо монохроматора можно пользоваться пластинкой Меланхолина (стр. 227). При этом вариация по длине волны производится не непрерывно, а скачками, но непрерывность хроматической вариации и не обязательна при наличии непрерывной температурной вариации. Рефрактометр может быть заменен микрорефрактометром, находящимся на столике микроскопа, а водяное обогревание — электрическим. Ряд приспособлений для метода двойной вариации разработан сотрудниками Института минерального сырья, к работам которых мы и отсылаем желающих пользоваться этим методом.¹

Метод двойной вариации имеет следующие преимущества перед иммерсионным методом в его простом виде.

1. Он позволяет получать более точные результаты, так как показатель преломления жидкости приводится к полному совпадению с показателем преломления зерна (в пределах чувствительности полоски Бекке) и измеряется на рефрактометре в момент совпадения, в то время как обычно мы добиваемся лишь того, чтобы показатель преломления зерна лежал в интервале между показателями преломления двух соседних жидкостей иммерсионного набора, причем значения показателей жидкостей в процессе измерения не проверяются.

2. Метод двойной вариации дает возможность легко измерить показатели преломления вещества для ряда длин волн и охарактеризовать его дисперсию.

3. Этот метод позволяет обходиться небольшим числом иммерсионных сред. Эммонс для интервала n_D от 1,42 до 1,74 предлагает набор, состоящий всего из 13 жидкостей, вместо 50—100, необходимых для работы иммерсионным методом в его обычном виде.

¹ Н. Е. Веденеева, Лабораторное руководство по иммерсионному методу, 1937, а также статьи Н. Е. Веденеевой о микрорефрактометре и Н. Меланхолина о нагревательном столике в сборнике «К методике кристаллооптических и петрографических исследований». Тр. Инст. прикл. мин. вып. 61, 1934.

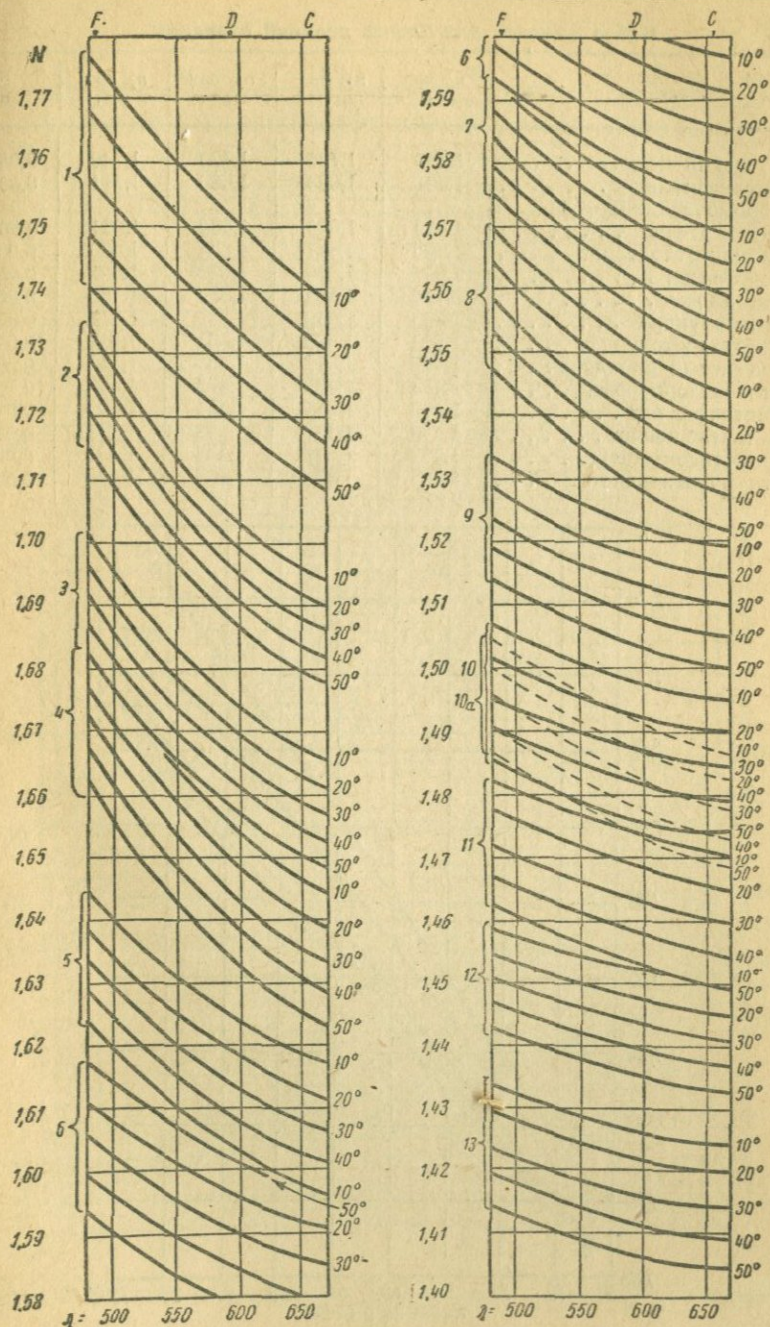


Рис. 146. Кривые дисперсии тринадцати жидкостей при разных температурах

Набор Эммонса для метода двойной вариации

Жидкости	n_C при 50° С	n_D при 24° С	n_D при 50° С	n_F при 50° С	$\frac{dn}{dT}$
1. Иодистый метилен	1,710	1,740	1,720	1,749	0,00070
2. α -иоднафталин	1,631	1,699	1,685	1,711	0,00044
3. α -бромонафталин + ди- бронафталин	1,649	1,669	1,559	1,681	0,00034
4. Фенилизотиоцианат	1,525	1,617	1,334	1,630	0,00054
5. Иодоензол	1,597	1,319	1,674	1,621	0,00053
6. Буомоформ	1,575	1,594	1,579	1,593	0,00057
7. Ортогалуидит	1,550	1,539	1,557	1,574	0,00047
8. Ортонитротолуол	1,523	1,545	1,531	1,547	0,00053
9. Бромистый пропилен	1,500	1,517	1,505	1,513	0,00049
10. Этиленхлорид	1,474	1,490	1,477	1,485	0,00053
10а. Метилфюрат	1,439	1,485	1,474	1,486	0,00044
11. Метилтиоцианат	1,450	1,457	1,453	1,461	0,00052
12. Триметиленхлорид	1,433	1,446	1,433	1,451	0,00045
13. Этилмоноклоридат	1,405	1,420	1,403	1,413	0,00040

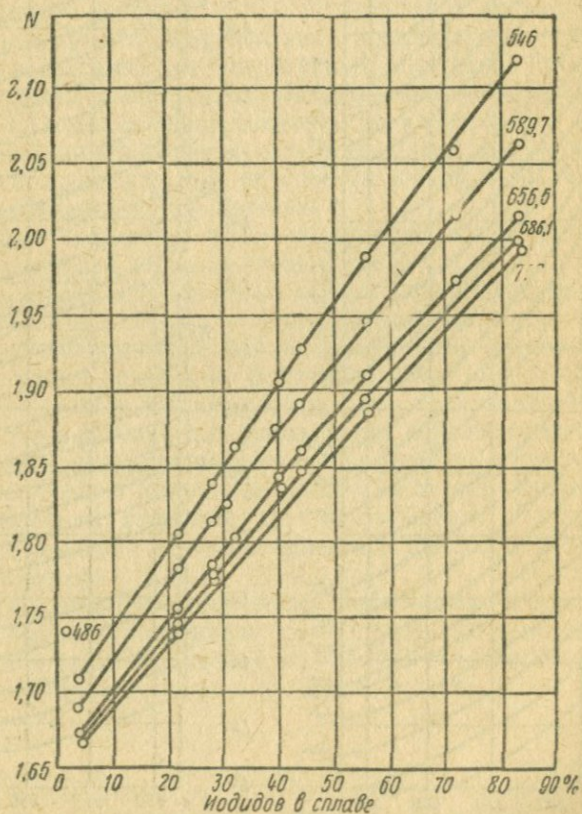


Рис. 147. Показатели преломления сплавов пиперина с иодидами для света разных длин волн.

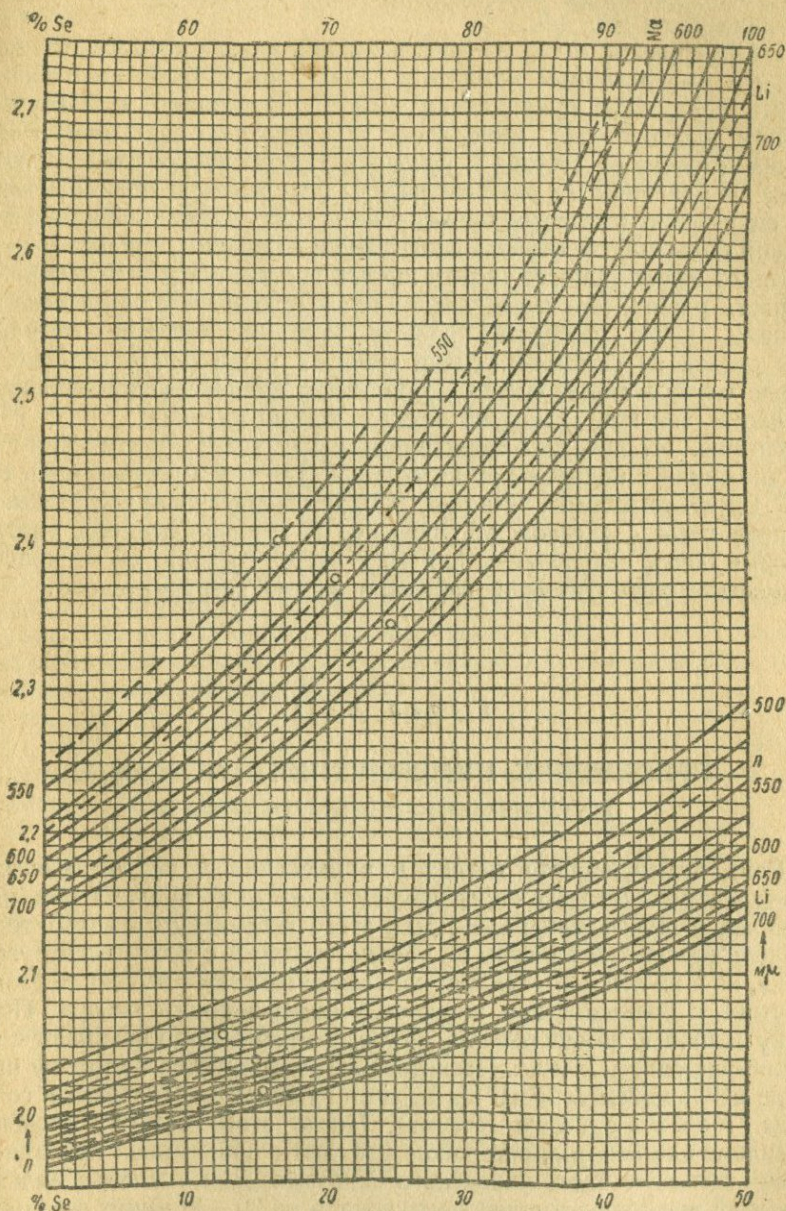


Рис. 148. Показатели преломления сплавов серы с селеном для света разных длин волн.

Кривые дисперсии этих жидкостей при температурах от 10 до 50° изображены на рис. 146.

Таким образом, метод двойной вариации имеет преимущества перед простым иммерсионным методом в случае, когда требуется точно измерить показатели преломления вещества (например, при изучении свойств новооткрытых минералов, при изучении зависимости оптических свойств от состава в пределах данной изоморфной группы и т. п.). В условиях же рядовой работы при определении вещества по его оптическим свойствам применение метода двойной вариации в огромном большинстве случаев оказывается излишним, так как точность обычного иммерсионного метода вполне достаточна для этих целей, а скорость работы при смене жидкостей в препарате с закрепленными зернами выше скорости работы методом двойной вариации. При работе со сплавами, смена которых в препарате невозможна, в ряде случаев может оказаться полезным применение хроматической вариации, так как дисперсия сплавов весьма высока.

На рис. 147 показана зависимость показателей преломления сплавов пиперина с иодидами от их состава, для света разных длин волн по С. Грум-Гржимайло.¹ На рис. 148 дана аналогичная диаграмма для сплавов серы с селеном по Ларсену. В густоокрашенных сплавах, которые почти непрозрачны для всех частей спектра, кроме красной, применение хроматической вариации весьма затруднительно.

Глава XXII

ПРИМЕНЕНИЕ ИММЕРСИОННОГО МЕТОДА К ПЕТРОГРАФИЧЕСКИМ ШЛИФАМ

Роль иммерсионного метода в применении к петрографическим шлифам ограничивается определением показателей преломления, находящихся в шлифе минералов. Для этого необходимо предварительно удалить канадский бальзам не только сверху и с краев исследуемого зерна, но и из-под него, так как канадский бальзам вступает во взаимодействие с большинством жидкостей иммерсионного набора. Подготовку шлифа к иммерсионному исследованию обычно начинают с удаления покровного стекла. Последнее легко сдвигается в сторону иглой после непродолжительного нагревания на спиртовке (нагревать со стороны покровного стекла). После этого ваткой, смоченной в ксилоле или бензоле, осторожно удаляют с обнаженной поверхности шлифа большую часть канадского бальзама. Для удаления бальзама с нижней поверхности шлиф погружается на 20—30 минут в ванночку с растворителем. В качестве растворителя обычно берется ксилол.

¹ Исследование сплавов пиперина с иодидами. Труды Института прикл. мин., вып. 61, 1934, стр. 22.

(Н. Е. Веденева рекомендует применять денатурированный спирт, смешанный с амилацетатом в отношении 2 : 1.) Чтобы узнать, полностью ли растворился канадский бальзам, вынимают препарат из ванночки и переворачивают предметным стеклом вверх. (Делать это над листом белой бумаги, так как возможно падение отклеившегося шлифа с предметного стекла.) После испарения растворителя прилегающая к предметному стеклу поверхность шлифа, если она освобождена от канадского бальзама, будет казаться матовой, а оставшиеся участки канадского бальзама — блестящими.

В. П. Петров, чтобы не разрушать для иммерсионного исследования весь шлиф, рекомендует поступать несколько иначе. Алмазом или карборундом отрезается часть (примерно четверть) покровного стекла над шлифом. Затем шлиф нагревается на спиртовке со стороны предметного стекла до появления первых пузырьков, после чего отрезанная часть покровного стекла вместе с прилегающим участком шлифа может быть отделена от предметного стекла. Отмывка этого отрезка шлифа от канадского бальзама производится обычным способом. После удаления канадского бальзама отрезок шлифа снимается с покровного стекла и переносится для исследования на чистое предметное. Полезно при этом осторожно вытереть его фильтровальной бумагой для удаления нерастворенных частей бальзама. Под микроскопом при малом увеличении отмытый шлиф разрезается бритвой или раскалывается иглой, чтобы получить свежий излом исследуемого минерала, так как на старых изломах часто остается тонкая пленка нерастворившегося бальзама, препятствующая исследованию (это относится и к предыдущему способу).

В тех случаях, когда интересующее нас зерно лежит вблизи края шлифа, мы с успехом применяли следующий простой способ. Сначала надрезаем покровное стекло, чтобы отделить участок с нужным нам минералом. Затем нагреваем шлиф со стороны покровного стекла и после размягчения прилегающего к покровному стеклу канадского бальзама приподнимаем иглой и удаляем отрезок покровного стекла. После этого ваткой, обильно смоченной в растворителе, осторожно обрабатываем обнаженную часть шлифа до исчезновения канадского бальзама под ней. Затем, подведя под эту часть шлифа лезвие бритвы, отделяем ее и переносим на чистое предметное стекло.

Перенеся отрезок шлифа на предметное стекло и получив свежую границу нужного минерала, смачиваем его каплей воды и высушиваем на спиртовке для прикрепления шлифа к стеклу. Затем шлиф накрывается маленьким покровным стеклом, под один из краев которого для создания просвета подкладывается кусочек такого же стекла. Иммерсионное исследование ведется, как обычно, путем смены жидкостей.

Если не преследуется очень высокая точность измерения, можно вести определение, не перенося отрезок шлифа на другое стекло, а просто прикрыв отмытую от бальзама часть шлифа маленьким покровным стеклом.

Глава XXIII

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИ-ИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ
В ИММЕРСИОННЫХ ПРЕПАРАТАХ

Для оптически-изотропных тел иммерсионное исследование дает лишь одну константу — показатель преломления. Попутно надо обращать внимание на следующие признаки: окраска, растворимость в воде, спайность.

Если вещество хотя бы в слабой степени растворимо в воде, то на краях капли, с помощью которой производилось закрепление зерен, после высушивания образуется каемка или корочка микроскопических кристаллов.

С п а и н о с т ь можно обнаружить, если исследуемый порошок получен путем дробления более крупных зерен, которые при этом раскалываются главным образом по спайности. Она проявляется в большей или меньшей правильности контуров зерен. Следует иметь в виду, что так обнаруживается спайность не ниже хорошей. Спаинность плохая, не ясно выраженная, в иммерсионных препаратах не обнаруживается.

Одних оптических признаков для определения изотропных минералов обычно недостаточно, так как основная константа — показатель преломления — у большинства минералов обнаруживает большие колебания. Если известен парагенезис минерала, то в большинстве случаев удастся определить его, исключая из рассмотрения минералы, близкие по оптическим свойствам, но не подходящие по парагенезису. В тех случаях, когда по оптическим свойствам равно подходят два минерала, один из которых имеет малый, а другой — большой удельный вес, к окончательному выводу можно прийти, произведя испытание порошка тяжелой жидкостью промежуточного удельного веса. Иногда приходится прибегать также к микрохимическим реакциям.

Глава XXIV

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
ОПТИЧЕСКИ-АНИЗОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛОВ

§ 1. Определение показателей преломления данного сечения

Оптически-анизотропные кристаллы в любом разрезе (кроме разреза перпендикулярного к оптической оси) имеют два показателя преломления n'_p и n'_g , соответствующие двум направлениям возможных колебаний в данном разрезе. Когда эти направления расположены косвенно относительно направления колебаний, пропускаемых поляризатором, через кристалл одновременно проходят две световых волны, и полоска

Бекке (или эффект косо́го освещения) обусловлена их совместным действием. В частности, если кристалл обладает значительным дву-преломлением и иммерсионная среда имеет показатель преломления промежуточный между показателями преломления кристалла, можно наблюдать две полосы, из которых одна при поднятии тубуса движется на кристалл, а другая на жидкость.

Поэтому при измерении показателей преломления оптически-анизотропного кристалла поступают аналогично тому, что делается при исследовании плеохроизма (гл. X, § 3). А именно: полосу Бекке (или эффект косо́го освещения) наблюдают не при случайном положении кристалла, а поставив его на погасание. В момент погасания, как мы знаем, через кристалл проходит лишь один луч, колебания которого совпадают с направлением колебаний луча, вышедшего из поляризатора (гл. II § 7). Поставив кристалл на погасание и выдвинув анализатор, мы наблюдаем полосу Бекке, обусловленную одним из двух показателей преломления данного сечения. Повернув после этого кристалл на 90° (поставив его на второе погасание), мы имеем дело уже со вторым показателем преломления данного сечения.

Таким образом, при измерении получают для данного сечения отдельно его больший (n'_g) и меньший (n'_p) показатели преломления. Однако, при определении вещества обычно необходимо знать не показатели случайного разреза n'_g и n'_p , а главные показатели преломления: n_g , n_m и n_p , находящиеся в определенных разрезах.

§ 2. Главные показатели преломления одноосных кристаллов

Одноосные кристаллы характеризуются двумя показателями преломления: n_o и n_e . Показатель преломления для обыкновенной волны во всех разрезах имеют одну и ту же величину. Поэтому, что очень важно, один из двух главных показателей преломления — n_o — может быть измерен в любом разрезе одноосного кристалла. Показатель преломления для необыкновенной волны имеет свое главное значение только в разрезе, параллельном оптической оси; во всех косых разрезах для необыкновенной волны получаем показатель n'_e , имеющий величину, промежуточную между n_e и n_o . В разрезе, перпендикулярном к оптической оси, кристалл имеет лишь один показатель преломления — n_o .

Какой из двух показателей преломления, измеренных в косом разрезе или разрезе, параллельном оптической оси, относится к волне o и какой — к волне e , зависит от оптического знака кристалла. Как мы знаем, в положительных кристаллах показатель преломления для обыкновенной волны меньше, чем для необыкновенной ($n_o < n_p$), а в отрицательных — наоборот ($n_o > n_g$).

Изложенное удобно представить в виде следующей таблички, показывающей, какие показатели преломления могут быть измерены

в различных разрезах положительных и отрицательных одноосных кристаллов:

Знак кристалла	+		-	
	<i>o</i>	<i>e</i>	<i>o</i>	<i>e</i>
Разрезы				
Перпендикулярные к опт. оси	n_p	—	n_g	—
Косые	n_p	n'_g	n_g	n'_p
Параллельные опт. оси	n_p	n_g	n_g	n_p

В справочниках, служащих для определения вещества иммерсионным методом,¹ одноосные кристаллы расположены в порядке возрастания n_o , который может быть определен в любом разрезе. Разрез,

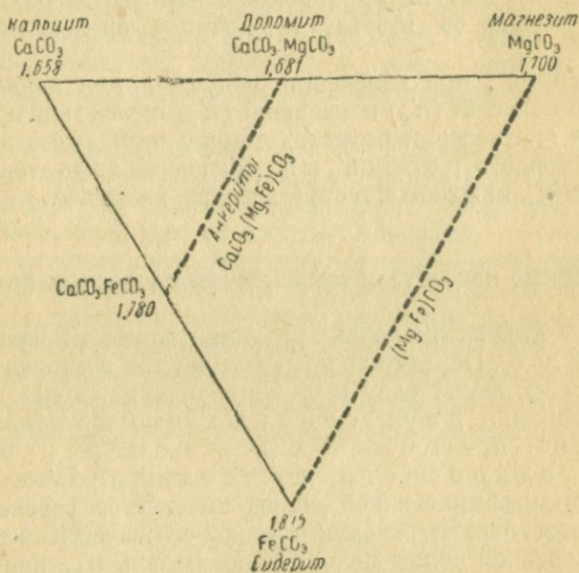


Рис. 149. Показатели преломления n_o для важнейших минералов группы кальцита.

параллельный оптической оси, в котором определяется главное значение n_e , не всегда может быть найден в препарате. В частности, нельзя рассчитывать встретить такой разрез, если кристалл обладает

¹ Е. Ларсени Г. Берман, Определение прозрачных минералов под микроскопом ОНГИ, 1937; А. Н. Винчелл, Оптика и микроскопия искусственных минералов, Госхимтехиздат, 1933; А. N. Winchell, Elements of optical mineralogy, Part III, Determinative tables.

хорошо выраженной спайностью по пинакoiду¹ или по грани, ориентированной косо относительно оптической оси (как ведется определение таких кристаллов, будет показано ниже).

§ 3. Определение минералов группы кальцита

На возможности измерения n_o в любом разрезе одноосного кристалла основан принятый в осадочной петрографии способ определения минералов группы кальцита (в частности, определения кальцита и доломита).

Важнейшие для осадочной петрографии минералы этой группы с их показателями преломления n_o показаны на диаграмме (рис. 149). Все эти минералы одноосны, отрицательны и характеризуются очень сильным и исключительно сильным двупреломлением ($n_o - n_e \approx 0,175 - 0,245$). Они обладают весьма совершенной спайностью по ромбоэдру, вследствие чего дают косые разрезы в иммерсионном препарате.

Приготовив из исследуемого карбоната препарат (можно простейшим способом), заполняют его жидкостью с показателем преломления, промежуточным между 1,66 и 1,68. В любом зерне карбоната исследуют *большой* показатель преломления. Если он *меньше* показателя преломления жидкости — перед нами кальцит. В обратном случае *брут* жидкость с показателем около 1,685. Если n_g минерала меньше этой величины, он определяется как чистый доломит. Если $n_g > 1,685$, берется жидкость с показателем $\sim 1,695 - 1,700$. Если $n_g < 1,700$, минерал можно считать железистым доломитом (анкеритом). При $n_g \geq 1,700$ состав минерала не может быть однозначно определен этим методом, так как показатели преломления больше 1,700 возможны как в анкеритовом, так и в мезититовом ряде карбонатов.

§ 4. Главные показатели преломления двuosных кристаллов

Двuosные кристаллы характеризуются тремя главными показателями преломления: n_g , n_m и n_p , для определения которых необходимо исследовать минимум два определенным образом ориентированных зерна. В нижеследующей табличке показано, какие показатели преломления могут быть измерены в ориентированных разрезах положительных и отрицательных двuosных кристаллов:

Знак кристалла	+			-		
	Т. Б.	n_m	О. Б.	Т. Б.	n_m	О. Б.
Перпендикулярно к оптической оси . .	—	n_m	—	—	n_m	—
" " " острой биссектрисе	n_p	n_m	—	n_g	n_m	—
" " " тупой биссектрисе	—	n_m	n_g	—	n_m	n_p
" " " n_m	n_p	—	n_g	n_g	—	n_p

В косом разрезе, поскольку в двuosных кристаллах нет обыкновенного луча, получаем показатели n'_g и n'_p , для которых справедливо следующее неравенство:

$$n_g \geq n'_g \geq n_m \geq n'_p \geq n_p.$$

¹ Для определения n_e одноосных (и псевдоодноосных) кристаллов, обладающих слодопоподобной спайностью, Ларсен рекомендует вырезать из спайной пластинки такого кристалла очень узкую полоску и, согнув ее под прямым углом, класть в иммерсионном препарате на ребро.

Из этого выражения видно, что истинное значение n_g может быть либо равно, либо больше n'_g , определенного в косом разрезе. Истинное значение n_p либо равно, либо меньше n'_p . Что же касается значения n_m , то для него n'_g и n'_p дают и верхний и нижний пределы. Поэтому, выбрав косой разрез, обладающий малым двупреломлением и определив в нем n'_g и n'_p , мы тем самым получаем с достаточной точностью значение n_m .

Таким образом, значение n_m может быть определено почти во всех случаях. Поэтому в справочниках двuosные кристаллы располагаются в порядке возрастания именно показателя n_m .

§ 5. «Обыкновенный» луч в двuosных кристаллах

Особо следует остановиться на двух случаях, когда нахождение показателя n_m встречает затруднения. Первый — когда кристаллы обладают совершенной спайностью по грани, перпендикулярной к оси n_m . В этом случае все зерна дают разрез, перпендикулярный к n_m , в котором измеряются n_g и n_p . Значение же n_m , по которому отыскивается вещество в справочнике, остается при этом неизвестным. Второй случай, когда спайность проходит перпендикулярно к тупой биссектрисе. В этом случае определяются n_m и О. Б., но коноскопическая фигура данного разреза во многих случаях (когда $2V$ не очень велико) практически не отличима от фигуры разреза, перпендикулярного к n_m . Поэтому исследователь не может быть уверен, определены ли им О. Б. и n_m или же n_m осталось неизвестным, а определены О. Б. и Т. Б.

В этих случаях надо иметь в виду, что у огромного большинства веществ n_m имеет значение очень близкое либо к n_g , либо к n_p . Только у тех кристаллов, у которых $2V$ почти равно 90° , n_m отличается и от n_g и от n_p примерно на одну и ту же величину. В качестве примера¹ приводим нижеследующую таблицу:

Название минерала	$2V$	n_g	n_m	n_p	$n_g - n_m$	$n_m - n_p$
Эритрин	$+89^\circ \pm$	1,699	1,662	1,626	0,037	0,026
Микроклин	$-83^\circ \pm$	1,525	1,522	1,518	0,003	0,004

При уменьшении угла $2V$, n_m очень быстро начинает приближаться по своей величине у положительных кристаллов к n_p , а у отрицательных к n_g , и уже при средних углах $2V$ у веществ с умеренным двупре-

¹ Здесь и в дальнейших примерах константы приведены по Ларсену.

ломлением n_m оказывается почти равным n_g или n_p . Примеры этого показаны в нижеследующей таблице:

Название минерала	$2V$	n_g	n_m	n_p	$n_g - n_m$	$n_m - n_p$
Положительные						
Гипс	58°	1,530	1,523	1,521	0,007	0,002
Целестин	51	1,631	1,624	1,622	0,007	0,002
Ангидрит	42	1,614	1,575	1,570	0,039	0,005
Отрицательные						
Мусковит	47°	1,588	1,582	1,552	0,006	0,030
Арагонит	18	1,685	1,681	1,530	0,004	0,151
Манганofilлит	14	1,636	1,636	1,622	0,000	0,014

Из сказанного вытекает, что если определены n_g и n_p , то оставшийся неизвестным n_m будет близок к n_p у положительных и к n_g у отрицательных кристаллов. В соответствии с этим и следует искать вещество в справочнике. Например, пусть для положительного минерала определены $n_p \approx 1,570$ и $n_g \approx 1,615$. n_m должно быть несколько больше, чем n_p . Просматриваем по справочнику положительные минералы, начиная от $n_m = 1,570$, и отбрасываем те из них, у которых n_p и n_g значительно отличаются от определенных нами. Быстро находим ангидрит, у которого $n_m = 1,575$, а n_p и n_g совпадают с найденными. В случае отрицательного минерала просмотр справочника надо начинать с n_m , равного измеренному n_g , и идти в сторону уменьшения величины n_m .

Из изложенного вытекает также, что, если исследователь не знает, имеет ли он разрез перпендикулярный к n_m или к Т. Б. (которые неотличимы при небольших $2V$), это обстоятельство не является препятствием при диагностике минерала, так как величины показателей преломления по Т. Б. и n_m , в случае небольшого $2V$, практически почти совпадают.

Третье следствие, имеющее весьма большое значение, заключается в следующем: если n_m имеет величину, близкую к одному из двух других главных показателей преломления, то в разных косых разрезах n'_p и n'_g будут изменяться в различной степени. В положительных кристаллах n'_p , как заключенное между мало отличающимися друг от друга n_p и n_m , почти не изменяется, в то время как n'_g может испытывать значительные колебания в зависимости от ориентировки разреза. В отрицательных, наоборот, n'_g испытывает значительно меньшие колебания в своей величине, чем n'_p . Поэтому с некоторым допущением можно и в двусных кристаллах аналогично одноосным рассматривать: в положительных n'_p , а в отрицательных n'_g , как показатель преломления «обыкновенного» луча, т. е. считать его весьма близким и к n_m и к Т. Б. Значительно за пределы точности метода это допущение может вывести нас в случае сильно двупреломляющих кристаллов

с большим $2V$, но и тут в порядке первого приближения можно n'_p в положительных и n'_g в отрицательных кристаллах рассматривать как близкий к n_m и Т. Б.

Это свойство показателя преломления «обыкновенного» луча делает его весьма ценным при диагностике вещества. Именно от него надо начинать поиски вещества в справочнике, если кристаллы в препарате дают исключительно одни косые разрезы.

§ 6. Отличие барита от целестина и определение минералов группы арагонита

Показатель преломления «обыкновенного» луча может быть использован для определения некоторых, близких друг к другу по оптическим свойствам веществ. Например, положительные барит и целестин имеют следующие показатели преломления:

	n_p	n_m	n_g
Барит ($BaSO_4$)	1,635	1,637	1,648
Целестин ($SrSO_4$)	1,622	1,624	1,631

У барита n'_p может колебаться от 1,636 до 1,637, а у целестина — от 1,622 до 1,624. Следовательно, в любой жидкости, имеющей показатель преломления промежуточный между 1,624 и 1,636, эти минералы без труда различаются между собой по меньшему показателю преломления независимо от того, с каким разрезом мы имеем дело.

Аналогично различаются между собой оптически отрицательные ромбические минералы группы арагонита. По Ларсену главные представители этой группы имеют следующие показатели преломления:

	n_p	n_m	n_g
Стронцианит ($SrCO_3$)	1,520	1,667	1,667
Витерит ($BaCO_3$)	1,529	1,676	1,677
Арагонит ($CaCO_3$)	1,530	1,680	1,685
Церуссит ($PbCO_3$)	1,804	2,076	2,078

Бромлит (Ba, Ca, Sr) CO_3 по величине показателей преломления занимает место, промежуточное между стронцианитом и витеритом, тарновитцит — (Ca, Pb) CO_3 — между арагонитом и церусситом. Как видно из приведенной таблички, все эти минералы однозначно могут быть отличены друг от друга по показателю преломления «обыкновенного» луча, роль которого играет в данном случае показатель n'_g .

§ 7. Стагастический метод определения главных показателей преломления, знака и осности кристаллов

В тех случаях, когда исследуемый материал настолько мелкозернист, что применение коноскопии невозможно, для определения главных показателей преломления приходится прибегать к так называемому статистическому способу. Состоит этот способ в измерении на большом

числе зерен показателей n'_g и n'_p и в выводе, на основании этих данных, заключения о величине n_g , n_m и n_p .

Определение n_m . Измерив показатели преломления ряда зерен, берем самый большой из полученных n'_p и самый малый из полученных n'_g . Они дают интервал, в котором заключается значение n_m . Обычно этот интервал весьма узок, и тем самым n_m определяется с большой точностью.

Определение n_g и n_p . Самый большой из измеренных n'_g принимается за n_g , а самый малый из n'_p — за n_p . Это определение не обладает достоверностью предыдущего. Строго говоря, полученные цифры дают лишь нижний предел возможных значений n_g и верхний предел значений n_p . Являются ли эти цифры самыми главными показателями, мы не имеем возможности проверить. В частности, если исследуемое вещество обладает хорошей спайностью или представлено ограниченными кристаллами, число возможных в препарате разрезов ограничено, и среди них могут отсутствовать те, в которых лежат главные оси индикатрисы. В этом случае, увеличивая число зерен, мы отнюдь не повышаем степень приближения измеренных n'_g и n'_p к главным показателям преломления n_g и n_p .

Определение знака. В большинстве случаев статистическое исследование позволяет правильно определить оптический знак кристалла. Почти всегда n_m по своей величине значительно ближе к одному из двух других главных показателей преломления, чем к другому. Кристалл положителен, если n_m приближается по величине к n_p (или совпадает с ним) и, наоборот, отрицателен, если n_m приближается по величине или совпадает с n_g .

Определение осности. В одноосных кристаллах, как мы знаем, один из двух показателей преломления сохраняет свою величину постоянной во всех разрезах. Однако в пределах точности иммерсионного метода так же ведут себя и двуосные кристаллы, если они не обладают большим углом оптических осей или значительным двупреломлением. Поэтому на основании данных статистического исследования можно лишь подозревать, что исследуемые кристаллы являются одноосными, но нельзя эту одноосность считать твердо установленной. Двуосность же в типичных случаях можно определить с большей достоверностью. Кристаллы являются двуосными, если ни n'_g , ни n'_p не остаются постоянными во всех разрезах (об источнике ошибок, возможных и в этом случае, будет сказано ниже).

Общие замечания по поводу статистического метода. Этот метод основан на предположении, что ориентировка зерен в иммерсионном препарате является случайной и, следовательно, подчиняется закону больших чисел. В большинстве случаев эта предположка оказывается неправильной. Если исследуемый порошок состоит из ограниченных кристаллов, они ложатся на предметное стекло своей наиболее развитой гранью. В этом случае все кристаллы дают один и тот же разрез. В лучшем случае кристаллы имеют не одну, а 2—3 сильно развитых формы и дают соответственное число разных разрезов. Если исследуемый порошок получен путем дробления более крупных кристаллов, то при наличии четко выраженной спайности число возможных ориентировок также ограничено. Поэтому пользоваться статистическим методом можно лишь с большой осторожностью. Как уже отмечено, из всех данных, получаемых этим методом, наибольшего доверия заслуживает величина n_m так как мы получаем и верхний и нижний пределы ее возможных значений. Все остальные результаты, включая определение знака осности, могут оказаться ошибочными благодаря закономерной ориентировке зерен в препарате.

Статистический метод имеет еще один серьезный недостаток. Дело в том, что многие вещества, представляющие собой изоморфные смеси, особенно из числа минералов, обнаруживают колебания своих оптических свойств. Небольшие, а иногда и довольно значительные колебания могут обнаруживаться даже в пределах одного иммерсионного препарата. При обычном ходе исследования — комбинации иммерсионного метода с коноскопией — это обстоятельство не является препятствием к определению минерала, а в ряде случаев, наоборот, может даже служить одним из диагностических признаков. При статистическом исследовании оно может явиться источником серьезных ошибок; так, колебания в величине показателей n'_g и n'_p в разных зернах могут быть ошибочно приняты за признак, указывающий на различную ориентировку этих зерен и, следовательно, на отсутствие спайности. Далее, приняв за n_g наибольший из n'_g , а за n_p — наименьший из n'_p , взятые на разных зернах, мы можем получить резко преувеличенное значение для силы двупреломления, которая является одним из важнейших диагностических признаков. Наконец, колебания в величине обоих показателей преломления у разных зерен могут быть приняты за доказательство двуосности, в то время как в действительности вещество является — одноосным.

Все изложенное заставляет считать данный метод весьма ненадежным и пользоваться им лишь в исключительных случаях, рассматривая получающиеся при этом данные только как первое приближение.

Глава XXV

СПАЙНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ В ИММЕРСИОННЫХ ПРЕПАРАТАХ

§ 1. Введение

В противоположность тому, что имеет место в петрографических шлифах, в иммерсионных препаратах спайность почти никогда не наблюдается в виде системы трещин на кристаллических зернах. Здесь спайность проявляет себя в правильной форме обломков, получающихся при раздроблении кристаллов и в закономерной ориентировке этих обломков, лежащих обычно на предметное стекло гранью наиболее совершенной спайности. Наиболее отчетливо видна спайность в порошках, приготовленных для исследования путем измельчения более крупных кристаллических зерен. В кластических осадочных породах (песках и песчаниках), зерна которых являются продуктом механического разрушения кристаллов природными силами, спайность в большей или меньшей степени затухевана процессами окатывания, и обнаружение ее требует большей наблюдательности, чем в первом случае. В порошках, состоящих из мелких ограненных кристаллов (например, искусственные химические продукты), спайность не видна. В этом случае рекомендуемый нами метод исследования спайности может быть применен только для выяснения осности и сингонии кристаллов и определения наиболее развитых на кристалле простых форм.

Спайность, обуславливая одинаковую ориентировку зерен в препарате, часто препятствует определению всех главных показателей преломления и может, как увидим далее, привести неопытного работника к неправильному заключению об осности кристаллов исследуемого вещества. Если же принимать во внимание указываемые ниже признаки, спайность не только не препятствует исследованию, но превращается в фактор, способствующий получению ряда дополнительных констант для определяемого вещества. Характер спайных обломков дает указание на осность кристаллов в тех случаях, когда коноскопические фигуры не дают однозначного решения вопроса и нередко позволяет установить сингонию кристаллов. Наконец, сама спайность является ценнейшим признаком, чрезвычайно облегчающим диагноз вещества и повышающим достоверность сделанного определения.

При исследовании спайности надо обращать внимание на форму обломков и на получаемые в них коноскопические фигуры. При весьма совершенной спайности все свободнолежащие зерна дают одинаковую коноскопическую фигуру. Если спайность является только совершенной или хорошей, не все зерна ложатся точно на грань спайности. В этом случае, просматривая коноскопические фигуры ряда зерен, мы выявляем наиболее часто встречающуюся ориентировку, связанную со спайностью.

Спайная выколка, имеющая несколько граней, ложится обычно на предметное стекло своей наиболее крупной гранью. Остальные грани проявляются в виде прямолинейных контуров спайной выколки. Если вещество обладает спайностью не по одной, а по двум или большему числу простых форм, мы будем называть главной или основной ту форму спайности, на грани которой зерно лежит. Д о б а в о ч н о й или второстепенной будем называть спайность, которая проявляется только в контурах зерна. В случае, когда одна спайность по степени совершенства резко превосходит другую, первая почти на всех зернах является главной, а вторая — добавочной. Если же обе спайности примерно одинаково совершенны, то для одних зерен главной является одна, а для других — другая спайность.

Добавочная спайность далеко не всегда проявляется в контурах обломков в виде длинных прямых ребер; чаще мы видим неправильные или закругленные (особенно у окатанных зерен) очертания, в которых только местами заметны короткие прямые линии, обусловленные спайностью.

Спайность ниже хорошей обычно не проявляется ни в виде главной, ни в виде добавочной. Однако бывают и исключения. Так, например, у гипса иногда заметна в качестве добавочной несовершенная спайность по $\{111\}$ и $\{100\}$. В некоторых, редких случаях меняется порядок спайности. Например, у ангидрита совершенная спайность по $\{010\}$ бывает главной гораздо чаще, чем весьма совершенная по $\{001\}$. Интересно заметить, что у диаспора иногда отчетливо выявляется спайность по $\{100\}$, которая для него вообще не упоминается. Повидимому спайность, выявляемая путем раздавливания кристалла в порошок,

не всегда вполне эквивалентна спайности, которая обнаруживается обычным методом раскалывания кристаллов или при шлифовании. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

§ 2. Спайность в одноосных кристаллах

В одноосных кристаллах возможна спайность по пинакоиду, по косой грани и по призме.

Спайность по пинакоиду ($\{001\}$ в тетрагональных и $\{0001\}$ в гексагональных кристаллах). Спайные обломки имеют форму пластинок, изотропных в скрещенных николях и дающих в сходящемся свете фигуру разреза, перпендикулярного к оптической оси. Контуры спайных пластинок — неправильные. Если, кроме спайности по пина-

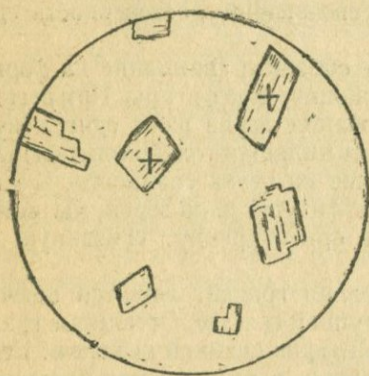


Рис. 150. Спайные выколки кальцита (спайность по ромбоэдру $\{1121\}$)

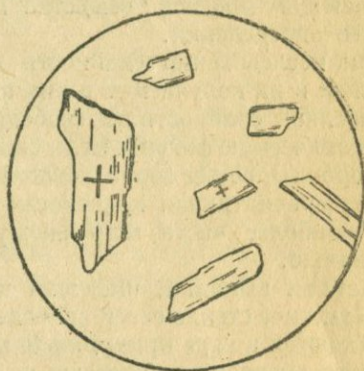


Рис. 151. Скаполит (спайность по призме).

коиду, имеется также спайность по призме, контуры могут иметь очертания, приближающиеся к прямоугольным у тетрагональных кристаллов и к шести- или трехугольным у гексагональных.

Спайность по косой грани ($\{hk1\}$, обычно $\{111\}$ или $\{101\}$ в тетрагональных и $\{hk\bar{1}\}$, обычно $\{11\bar{2}1\}$ или $\{10\bar{1}1\}$ в гексагональных кристаллах). Косые грани спайности в кристаллах средних сингоний образуют замкнутые простые формы (ромбоэдры, дипирамиды и пр.). Поэтому спайность проявится не только в том, что все обломки будут лежать на гранях одной простой формы, но и в том, что эти обломки — спайные выколки — будут со всех сторон ограничены гранями этой же простой формы и, следовательно, будут иметь более или менее правильную (в зависимости от степени совершенства спайности) форму (например, ромбоэдрические спайные выколки карбонатов группы кальцита — рис. 150). Оптическая ось кристалла проектируется на горизонтально-лежащую грань спайной выколки параллельно биссектрисе одного из ее углов, поэтому погасание спайной выколки относительно ее ребер будет симметричным (симметричность нарушается при не вполне горизонтальном положении нижней грани

спайной выколки). В сходящемся свете все зерна дают одинаковую фигуру косого разреза одноосного кристалла.

Спайность по призме ($\{hk0\}$, обычно $\{110\}$ или $\{100\}$ в тетрагональных и $\{h\bar{1}k0\}$, обычно $\{1\bar{1}20\}$ или $\{10\bar{1}0\}$ в гексагональных кристаллах). В сходящемся свете спайные выколки дают фигуру разреза, параллельного оптической оси одноосного кристалла (быстро разбегающийся неясный крест). Спайные выколки лежат на одной грани призмы и ограничиваются с двух сторон другими гранями призмы. Такая выколка имеет форму удлиненного бруска с неровными концами и с прямым погасанием (например, скаполит, рис. 151). Знак удлинения выколки относительно ее прямых ребер всегда совпадает с истинным оптическим знаком кристалла.

Если кристалл одновременно обладает спайностью и по другой призме (как, например, у того же скаполита), это не отражается на облике спайных выколок под микроскопом. Если же, кроме спайности по призме, кристалл имеет спайность по пинакоиду, то спайные брусочки имеют не только прямые боковые грани, но и прямые концы. Если спайность по пинакоиду обладает примерно той же степенью совершенства, что и спайность по призме, то в препарате, кроме зерен, лежащих на грани призмы, можно встретить лежащие на грани пинакоида, дающие в сходящемся свете фигуру разреза, перпендикулярного к оптической оси.

§ 3. Спайность в двuosных кристаллах

Ромбическая сингония. В кристаллах ромбической сингонии спайность бывает по пинакоиду и по призме. Среди описанных до сих пор минералов нет обладающих совершенной спайностью по грани общего положения.

Спайность по пинакоиду ($\{100\}$, $\{010\}$, $\{001\}$). Грани пинакоида в ромбических кристаллах перпендикулярны к главным осям индикатрисы, поэтому спайная выколка по пинакоиду в сходящемся свете дает фигуру разреза \perp О. Б., \perp Т. Б. или $\perp n_m$. Если кристалл имеет только одну пинакоидальную спайность, очертания спайных обломков неправильные (например, силлиманит). При спайности по двум пинакоидам или по пинакоиду и призме, ось которой параллельна грани данного пинакоида, спайная выколка имеет форму бруска с неровными концами и с прямым погасанием (например, диаспор).

Если имеется хорошо выраженная спайность по трем пинакоидам, спайная выколка представляет собой ограниченный со всех сторон прямоугольный брусок (например, ангидрит, рис. 152) с прямым

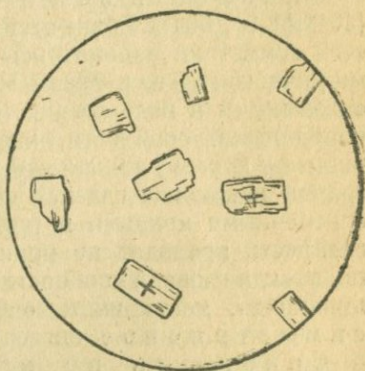


Рис. 152. Ангидрит. Ромбические кристаллы со спайностью по трем пинакоидам.

погасанием. Если, кроме спайности по одному из пинакоидов, имеется спайность по призме, ось которой перпендикулярна к грани данного пинакоида, то спайная выколка, лежащая на грани пинакоида, имеет очертания ромба или параллелограмма и обладает симметричным погасанием (например, барит).

Спайность по призме ($\{hk0\}$, $\{h0l\}$, $\{0kl\}$). Грани призмы у ромбических кристаллов проходят перпендикулярно к плоскостям симметрии индикатрисы. Поэтому кристаллы, лежащие на грани призмы, дают разрез косой по отношению к двум главным осям индикатрисы и параллельный третьей оси. В сходящемся свете такой разрез обнаруживает фигуру, подобную фигуре косого разреза одноосных кристаллов (гл. VIИ, § 4к). Спайная выколка имеет форму бруска с неровными концами и обладает прямым погасанием.

Дополнительная спайность по другой призме или пинакоиду, лежащим в зоне данной призмы, не влияет на очертания спайной выколки. Если же дополнительная спайность проходит по пинакоиду, перпендикулярному к оси призмы, спайная выколка приобретает очертания прямоугольника с прямым погасанием.

Моноклиная сингония. Спайность по пинакоиду $\{010\}$, в сходящемся свете дает фигуру разреза, перпендикулярную к одной из главных осей индикатрисы, именно к той, которая у кристаллов данного вещества совпадает со второй кристаллографической осью $[010]$. Если кристаллы других спайностей не обнаруживают, зерна имеют неправильные очертания. Если имеются второстепенные направления спайности, проявляющиеся в очертаниях зерен, спайные выколки обладают косым погасанием.

Спайность по пинакоиду зоны $[010]$ ($\{h0l\}$, обычно $\{101\}$, $\{100\}$, $\{001\}$). Грани этой зоны перпендикулярны одной из плоскостей симметрии индикатрисы. В сходящемся свете дают фигуру симметричного косого разреза. Часто при этом одна из осей индикатрисы оказывается в поле зрения. Форма выколок, при отсутствии других направлений спайности, неправильная. При дополнительной спайности по другому пинакоиду или по призме, ось которой параллельна граням пинакоида главной спайности, выколки имеют форму бруска с неровными концами и прямым погасанием. Если дополнительная спайность проходит по призме, ось которой не параллельна грани пинакоида главной спайности, то спайные выколки, лежащие на грани пинакоида, могут иметь очертания ромба или параллелограмма и симметричное погасание.

Спайность по призме ($\{hkl\}$, часто $\{110\}$). Спайная выколка имеет форму бруска с неровными концами. Погасание косое. Фигура в сходящемся свете — общий случай косого разреза двуосного кристалла (например, моноклинные пироксены и амфиболы).

Триклинная сингония. Спайность только по пинакоидам. Форма спайных выколок зависит от числа направлений спайности (при одной спайности — неправильная, при двух — форма бруска с неровными концами, при трех — параллелограмма). Погасание косое. Фигура в сходящемся свете — косой разрез двуосного кри-

сталла. Исключения могут быть только кажущиеся, когда, как, например, у дистена, одна из осей индикатрисы почти перпендикулярна к плоскости главной спайности.

§ 4. Определение осности кристаллов, обладающих хорошей спайностью

Наличие спайности, ограничивая число возможных разрезов, часто затрудняет определение осности кристаллов в иммерсионных препаратах. Чтобы показать, в чем причина возникающих здесь трудностей, кратко перечислим коноскопические фигуры всех разрезов, сгруппировав их следующим образом: 1) фигуры, свойственные исключительно одноосным кристаллам; 2) фигуры сомнительные — возможные и в одноосных и в двуосных кристаллах; 3) фигуры, свойственные исключительно двуосным кристаллам.

1. **Одноосные.** С несомненностью одноосность кристалла устанавливается только в одном случае, а именно: когда в поле зрения виден темный крест, не распадающийся при вращении столика.

2. **Сомнительные.** а) Через поле зрения поочередно проходят прямые темные балки, параллельные главным сечениям николей. Это — фигура не очень косога разреза одноосных кристаллов и разреза, перпендикулярного к плоскости симметрии индикатрисы двуосных.

б) Через поле зрения поочередно проходят изогнутые балки. Проходя через середину поля, балка выпрямляется и совпадает с главным сечением одного из николей. Сопутствующий конец балки тоньше и движется медленнее, чем встречный. Это фигура более косога разреза одноосных кристаллов и разреза, перпендикулярного к плоскости симметрии индикатрисы двуосных.

с) Виден широкий темный крест, который при вращении столика распадается на ветви гиперболы, быстро уходящие за пределы поля зрения. Угол просветления не превышает 15° при объективе № 6 или № 7. Это — разрез, параллельный оптической оси одноосных кристаллов, перпендикулярный к оси n_m двуосных и, в некоторых случаях, перпендикулярный к тупой биссектрисе двуосных.

3. **Двуосные.** а) Видна одна темная балка, не покидающая поля зрения при вращении столика. Это — фигура двуосного кристалла с выходом одной из оптических осей в поле зрения.

б) Балки проходят по очереди через поле зрения, причем в тот момент, когда балка проходит через середину поля зрения, она расположена косо по отношению к главным сечениям николей. Это — косога разрез двуосного кристалла.

с) Виден крест, который при вращении столика распадается на ветви гиперболы, не выходящие за пределы поля зрения. Это — разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе.

д) Виден крест, который при вращении столика распадается на ветви гиперболы, уходящие за пределы поля зрения. Угол просветления не меньше $16-17^\circ$ при объективе № 6 или № 7. Это — разрез,

перпендикулярный к тупой, а в некоторых случаях — к острой биссектрисе.

е) Через поле зрения по очереди проходят широкие балки. В тот момент, когда балка проходит через середину поля зрения, она совпадает с главным сечением одного из николей. При малейшем повороте она сильно изгибается, так как ее концы движутся с неодинаковой скоростью. При этом сопутствующий конец шире и движется быстрее, чем встречный. Это — разрез, перпендикулярный к одной из плоскостей симметрии индикатрисы двуосного кристалла.

Таким образом мы видим, что есть ряд фигур, одинаково свойственных как одноосным, так и двуосным кристаллам, и в частности установить одноосность кристаллов можно, строго говоря, только в том случае, если наблюдался выход оптической оси в поле зрения.

Происходящие отсюда затруднения с определением осности в очень многих случаях могут быть обойдены, и вопрос этот решается вполне однозначно, если учитывать форму зерен, дающих те или иные коноскопические фигуры. Разберем некоторые из возможных здесь случаев.

1. Если обломки одноосных кристаллов дают только косые разрезы, это, как уже указывалось, свидетельствует о хорошей спайности по косой грани. При этом спайные выколки будут со всех сторон ограничены гранями. Погасание спайной выколки относительно ее ребер будет симметричное.

Аналогичная коноскопическая фигура получается, как уже говорилось, и у двуосных кристаллов ромбической сингонии в спайных выколках по призме. В этом случае спайная выколка имеет форму бруска с прямым погасанием.

Этот признак позволяет безошибочно отличать ромбические кристаллы со спайностью по призме, дающие псевдоодноосные косые фигуры от одноосных кристаллов.

2. Одноосные кристаллы со спайностью по призме, дающие фигуру разреза, параллельного оптической оси, могут быть приняты за двуосные со спайностью по пинакоиду, перпендикулярному к оси n_x или тупой биссектрисе.

Здесь надо обращать внимание на следующее. Спайные выколки по призме одноосных кристаллов, дающие в сходящемся свете быстро разбегающийся серый крест, под микроскопом имеют форму бруска с прямым погасанием. При этом знак удлинения всегда совпадает с истинным знаком кристалла. В ромбических кристаллах сходная фигура получается в случае спайности по пинакоиду. Если вещество не имеет какой-либо другой спайности, спайная выколка, лежащая на грани пинакоида, имеет неправильные очертания. Если, кроме спайности по пинакоиду, имеется спайность по призме, ось которой перпендикулярна к пинакоиду, спайная выколка имеет очертания ромба или параллелограмма с симметричным погасанием. Этим она отличается от имеющей прямое погасание выколки по призме одноосных кристаллов. Хорошим примером здесь могут служить барит и целестин. Лежа на грани призмы, они дают разрез, подобный косому одноосных кристаллов; лежа на пинакоиде, — разрез, перпендику-

лярный к тупой биссектрисе, подобный, особенно у барита, разрезу, параллельному оптической оси одноосных кристаллов. Но в первом случае выколка барита дает прямое погасание, во втором — симметричное, а одноосные кристаллы дали бы, наоборот, в косом разрезе симметричное, а в разрезе, параллельном оси, прямое погасание.

Более трудный случай это тот, когда ромбический минерал, кроме спайности по пинакoidу, перпендикулярному к оси n_m , имеет спайность по другому пинакoidу или по призме, ось которой параллельна грани пинакoidа главной спайности. В этом случае мы имеем прямое погасание так же, как в соответственных случаях одноосных кристаллов. Если окажется, что знак удлинения не совпадает со знаком кристалла, двусосность минерала может считаться доказанной. (Например, диаспор: оптически положительный, у которого выколки по $\{010\}$, перпендикулярные к n_m , отсекаются призмой $\{210\}$, параллельной оси $\{001\}$, с которой совпадает n_p , в результате чего минерал имеет отрицательное удлинение.)

Если же оптические знаки удлинения и кристалла совпадают, вопрос об осности остается нерешенным, если не удастся найти выколку, лежащую на грани второй спайности.

§ 5. Ключ для определения форм спайности, осности и сингонии в иммерсионных препаратах

Здесь сведено все сказанное выше об определении форм спайности и осности кристаллов по характеру спайных выколок и наблюдаемых в них коноскопических фигур. Ключ охватывает не все теоретически возможные случаи, а только те, которые могут встретиться на практике при исследовании минералов. Ошибки, возможные при определении, почти всегда направлены в сторону повышения симметрии кристаллов. В этом отношении наиболее опасны кристаллы триклинной сингонии, у которых очень часто одна из главных осей индикатрисы почти перпендикулярна к грани спайности. Ошибочное понижение симметрии возможно для разрезов с симметричным погасанием, так как последнее легко переходит в косое при не вполне горизонтальном положении нижней грани спайной выколки.

Все случаи спайности разбиты в «ключе» на группы по форме спайных выколок, как по наиболее легко определяемому признаку. Эти группы делятся на меньшие по характеру погасания (прямое, симметричное, косое) и, наконец, по характеру коноскопических фигур.

Коноскопические фигуры делятся по четырем рядам: 1) *нерасходящийся крест* — разрез, перпендикулярный к оптической оси одноосного кристалла; 2) *расходящийся крест* — разрезы параллельно оптической оси одноосного кристалла, $\perp O. B.$, $\perp T. B.$ и $\perp n_m$ двусосного; 3) *симметричный косой разрез* — косые разрезы одноосного кристалла и разрезы, перпендикулярные к плоскости индикатрисы, но не к главным осям двусосного; 4) *косой разрез (общий случай)* — косые разрезы двусосного кристалла. Во втором и третьем рядах соединены, следовательно, фигуры одноосные и похожие на них двусосные. Те случаи, когда двусосность фигуры одного из этих двух рядов не вызывает сомнения (разрезы, перпендикулярные к $O. B.$ и симметричные косые разрезы с быстрым сопутствующим и медленным встречным концом изогирь или обнаруживающие выход главной оси индикатрисы в поле зрения), особо не выделяются. В этих случаях ключ служит только для определения форм спайности и сингонии кристаллов. Разрезы с выходом оптической оси двусосного кристалла относятся к симметрично-косым, если изогиря при вращении столика становится прямой и параллельной

асти в середине поля зрения. Если же она выпрямляется, находясь у края поля зрения, разрез относится к косым (общий случай).

А. Форма зерен неправильная.

I. Зерна дают различные коноскопические фигуры; спайности незаметно.

II. Коноскопическая фигура — нерасходящийся крест: одноосный, спайность по пинакоиду.

III. Коноскопическая фигура — расходящийся крест: ромбическая сингония; спайность по пинакоиду или моноклиная сингония; спайность по пинакоиду $\{010\}$.

IV. Коноскопическая фигура симметричного косога разреза: моноклиная сингония; спайность по пинакоиду зоны $[010]$.

V. Коноскопическая фигура косога разреза (общий случай): триклинная сингония.

В. Форма зерен — бруски с неровными концами.

I. Прямое погасание.

1. Коноскопическая фигура — расходящийся крест:

a) одноосный. Спайность по призме или по двум призмам;

b) ромбический. Главная спайность по пинакоиду, добавочная — по другому пинакоиду или по призме, ось которой параллельна пинакоиду главной спайности. (Если знак удлинения не совпадает со знаком кристалла, случай «a» исключается.)

2. Коноскопическая фигура симметричного косога разреза:

a) ромбическая сингония. Спайность по призме (возможна добавочная спайность по пинакоиду, лежащему в зоне призмы главной спайности);

b) моноклиная сингония. Главная спайность по пинакоиду зоны $[010]$, добавочная — по другому пинакоиду или по призме, ось которой параллельна пинакоиду главной спайности. (Если в поле зрения коноскопа лежит выход одной из главных осей индикатрисы, случай «a» исключается.)

II. Косое погасание.

1. Коноскопическая фигура — расходящийся крест: моноклиная сингония. Главная спайность по пинакоиду $\{010\}$, добавочная — по другому пинакоиду или по призме, ось которой параллельна $\{010\}$.

2. Коноскопическая фигура косога разреза (общий случай): a) моноклиная сингония. Спайность по призме (возможна добавочная спайность по пинакоиду, лежащему в зоне призмы главной спайности);

b) триклинная сингония. Спайность по двум пинакоидам.

С. Зерна огранены со всех сторон.

I. Прямое погасание.

1. Коноскопическая фигура — расходящийся крест:

a) кристалл одноосный; главная спайность по призме, добавочная — по пинакоиду;

б) ромбическая сингония. Спайность по трем пинакоидам; редко — по двум пинакоидам и призме, ось которой перпендикулярна к пинакоиду добавочной спайности. (Если знак удлинения не совпадает со знаком кристалла, случай «а» исключается.)

2. Коноскопическая фигура симметричного косо́го разреза:
 - а) ромбическая сингония; главная спайность по призме, добавочная — по пинакоиду, перпендикулярному к граням призмы;
 - б) монокли́нная сингония; главная спайность по пинакоиду зоны $\{010\}$, добавочная — по другому пинакоиду той же зоны и пинакоиду $\{010\}$.

II. Симметричное погасание.

1. Коноскопическая фигура — расходящийся крест: ромбическая сингония; главная спайность по пинакоиду, добавочная — по призме, ось которой перпендикулярна к данному пинакоиду.
2. Коноскопическая фигура симметричного косо́го разреза:
 - а) одноосный; спайность по косо́й грани;
 - б) монокли́нная сингония; главная спайность по пинакоиду зоны $\{010\}$, добавочная — по призме, ось которой почти перпендикулярна к данному пинакоиду (очень редко).

III. Косо́е погасание.

1. Коноскопическая фигура — расходящийся крест: монокли́нная сингония; главная спайность по пинакоиду $\{010\}$, добавочная — по двум другим пинакоидам или по пинакоиду и призме, ось которой не параллельна пинакоиду добавочной спайности, или по двум призмам, не лежащим в одной зоне.
2. Коноскопическая фигура косо́го разреза (общий случай):
 - а) монокли́нная сингония; главная спайность по призме, добавочная по пинакоиду или призме, не лежащим в зоне призм главной спайности;
 - б) трикли́нная сингония; спайность по трем пинакоидам.

IV. Изотропный разрез.

1. Коноскопическая фигура — нерасходящийся крест:
 - а) контур прямоугольный: тетрагона́льная сингония. Главная спайность по пинакоиду, добавочная — по призме, реже по косо́й грани.
 - б) контур трех (шести) угольный: гексагона́льная сингония. Главная спайность по пинакоиду, добавочная — по призме.

§ 6. Символы форм спайности в кристаллах разных сингоний

Здесь перечислены лишь те формы, которые встречаются в виде форм спайности на кристаллах минералов. Буквы в символах обозначают любые числа кроме нуля (0).

Одноосные кристаллы

Перпендикулярно к оптической оси (пинакоид): 001; 0001.

Параллельно оптической оси (призмы): 100; 110; $10\bar{1}0$; $11\bar{2}0$;

Косо к оптической оси (замкнутые формы): 101; 111; $10\bar{1}1$; $0\bar{1}11$; 0221 ; $10\bar{1}2$.

Ромбические кристаллы

Перпендикулярно к одной из главных осей индикатрисы (пинакоиды): 100; 010; 001.

Перпендикулярно к одной из плоскостей симметрии индикатрисы (призмы) $hk0$; $h0l$; $0kl$.

Косо ко всем главным осям индикатрисы (дипирамида): 111.

Моноклинные кристаллы

Перпендикулярно к главной оси индикатрисы (пинакоид): 010.

Перпендикулярно к плоскости симметрии индикатрисы (пинакоиды): 100; 001; $h0l$.

Косо к главным осям индикатрисы (призмы): $hk0$; $0kl$; hkl .

Триклинные кристаллы

Все формы спайности, независимо от символа.—пинакоиды, В общем случае расположены косо к осям индикатрисы.

§ 7. Переворачивание зерен в препарате для определения осности

Если, благодаря спайности, зерна в препарате не обнаруживают разрезов, пригодных для определения осности по коноскопической фигуре, а косвенные методы не дают однозначного результата, можно вывести зерна из горизонтального положения, чтобы получить разрез, дающий характерную коноскопическую фигуру. Делается это, по Ларсену, следующим образом. Препарат готовится без закрепления зерен. В качестве иммерсионной среды берется вязкая жидкость, лучше всего — жидкий канадский бальзам (можно раствор ксилола в канадском бальзаме). Препарат покрывается маленьким (4×4 мм) покровным стеклом. Чтобы покровное стекло не прижимало зерна, рекомендуется примешивать к исследуемому порошку толченое стекло. При слабом увеличении и скрещенных николях немного передвигают по препарату покровное стекло. Некоторые зерна при этом переворачиваются и меняют свою интерференционную окраску. Уловив в каком-либо зерне значительное понижение интерференционной окраски, останавливают движение покровного стекла и смотрят в этом зерне коноскопическую фигуру.

Глава XXVI

ХОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Если показатель преломления кристаллов вещества, подлежащего определению, неизвестен даже приблизительно, исследование начинают в какой-либо жидкости, взятой из средней части иммерсионного набора. Лицам, привыкшим к работе с петрографическими шлифами, рекомендуется начинать исследование в жидкости, имеющей показатель преломления 1,540—1,545 (близкий к показателю канадского бальзама). В такой жидкости рельеф зерен аналогичен рельефу в шлифах, что облегчает суждение о приблизительной величине показателя вещества.

В первой жидкости производится определение знака и осиности кристаллов и характера спайности, а если возможно — и сингонии. Наиболее удобным для такого исследования, при котором все время приходится переходить от среднего увеличения к сильному и обратно, является микроскоп, снабженный револьвером с центрирующимися гнездами. Впрочем, достаточно быстро идет работа и с обычным микроскопом, в котором оправы объективов снабжены центрировочными приспособлениями. Как поступать, если центрировочный аппарат монтирован на нижнем конце тубуса микроскопа, сказано на стр. 48.

Попутно определяют и все другие оптические свойства кристаллов, кроме показателей преломления (плеохроизм, углы погасания в разных сечениях, дисперсия осей, примерная величина угла $2V$ или $2E$). Только после этого, выбрав подходящие разрезы, переходят к определению показателей преломления.

Составив по рельефу зерен примерное представление о величине их показателя преломления, вторую жидкость берут с таким расчетом, чтобы показатель преломления исследуемых кристаллов оказался в интервале между показателями этих жидкостей. Затем суживают этот интервал, пока искомый показатель преломления не будет определен с точностью до интервала между двумя соседними жидкостями иммерсионного набора. Опытному исследователю при наборе из 100 жидкостей для определения показателя преломления требуется сменить жидкость максимум 4—6 раз. Если одновременно измеряются два или три показателя, число смен увеличивается до 7—8.

После измерения обращаются к определителю для минералов. Наиболее удобным является имеющийся в русском переводе Определитель-справочник В. Ларсена и Г. Бермана (Определение прозрачных минералов под микроскопом). В этой книге минералы разбиты по осиности и знаку на 5 групп (оптически-изотропные, одноосные положительные, одноосные отрицательные, двuosные положительные, двuosные отрицательные). Одноосные минералы расположены в порядке возрастания показателя n_o (ω), двuosные — в порядке возрастания n_m (β).

Открыв соответствующий раздел справочника, находим страницы, на которых помещены минералы с n_m , близких к определенному нами.

У большинства минералов показатели преломления могут колебаться в довольно широких пределах, поэтому приходится принимать во внимание все минералы, n_m которых лежит в довольно широком интервале, по крайней мере до $\pm 0,010$ от измеренного. (В некоторых случаях приходится брать еще более широкий интервал.) Таким образом перед нами оказывается список иногда до 30—40 минералов, из которых следует сделать выбор. Если измерены все главные показатели преломления, выбор значительно облегчается, так как из этого списка можно исключить все минералы, значительно отличающиеся от нашего по силе двупреломления ($n_g - n_p$). (Сила двупреломления у большинства минералов при изменении показателей преломления испытывает лишь незначительные колебания.) Затем исключаем минералы, явно не подходящие по другим легко определяемым признакам, например по цвету и плеохроизму, если наш минерал имеет характерную окраску. При этом необходимо соблюдать осторожность, так как, во-первых, окраски минералов могут меняться в довольно широких пределах, а, во-вторых, соответствующие графы в справочнике Ларсена составлены не вполне безукоризненно. Так, в графе «цвет» указывается без соответствующей оговорки то окраска минерала в петрографическом шлифе в проходящем свете, то окраска, которую он имеет в крупных штуфах. Плеохроизм в большинстве случаев описывается так, как он виден в шлифах, иногда же отмечается плеохроизм, заметный только в толстых кристаллах. (Необходимо помнить, что чем толще зерна в иммерсионном препарате, тем резче выражен плеохроизм.)

Наконец, рассмотрев для оставшихся минералов данные о сингонии, оптической ориентировке¹ и спайности, в большинстве случаев приходим к одному возможному решению. Найдя название исследуемого минерала по определителю, желательнее подтвердить это определение и по другим известным для него свойствам помимо оптических. Следует также принять во внимание характер парагенезиса. Кроме того, если минерал, на котором мы остановились при определении, имеет показатели преломления, довольно значительно отличающиеся от измеренных нами, необходимо убедиться в том, что для данного минерала возможны такие колебания в величине показателей преломления.² Поэтому, кроме определителя, надо иметь под рукой и специальные минералогические справочники. Из них наиболее подходящими для наших целей рекомендуем справочник Винчелла³ и Г. Дана, Описательная минералогия.

¹ В графе «Оптическая ориентировка» оси индикатрисы n_p , n_m и n_g соответственно обозначены через X, Y и Z; n_p , n_m и n_g , как показатели преломления, обозначены — α , β , γ . Кристаллографические оси {100}, {010} и {001} соответственно обозначены a, b и c. Для того чтобы по данным об ориентировке можно было судить о коноскопических фигурах, наблюдаемых на гранях спайности, напомним, что ось b всегда перпендикулярна к грани {010}, кроме того, в ромбической сингонии $a \perp 100$ и $c \perp 001$.

² Во втором американском издании книги Ларсена для многих минералов особыми значками отмечен диапазон возможных колебаний оптических свойств.

³ A. N. Winchell, Elements of optical mineralogy. Part II. Description of minerals.

Чтобы пояснить ход определения минерала по книге Ларсена, приведем несколько примеров.

1. Бесцветный минерал. В иммерсионном препарате в большом количестве присутствуют зерна, оконтуренные в форме прямоугольников и реже параллелограмов. Кроме того, имеются зерна с частично правильными очертаниями, имеющие по 2—3 прямых ребра. Число совершенно неправильных зерен сравнительно невелико. Из ограненных зерен большинство обладает прямым погасанием. Знак удлинения $+$ и $-$. Меньшая часть обнаруживает косое погасание, иногда весьма приближающееся к симметричному.

Коноскопические фигуры: а) в спайных выколках с прямым погасанием — прямые балки, проходящие параллельно нитям (косой разрез одноосного или перпендикулярный к плоскости симметрии индикатрисы двусосного кристалла); б) в выколках с косым, приближающимся к симметричному погасанием — быстро расходящийся крест (разрез параллельный оптической оси одноосного или \perp , n_m , или \perp Т. Б. двусосного кристалла); с) в зернах неправильной формы и в зернах с малым углом погасания большей частью получаем фигуру случая «а», реже — случая «б» и очень редко — фигуру косого разреза, обнаруживающую двусосность данного минерала. (Зерна, дающие фигуру последнего рода, могут и отсутствовать в препарате.) Оптический знак минерала $+$.

Таким образом устанавливаем два типа спайных выколов:

1. Бруски, ограненные со всех сторон, дающие коноскопическую фигуру симметричного косого разреза. Согласно ключу, это может быть ромбическая сингония — главная спайность по призме, добавочная — по перпендикулярному к ней пинакoidу, или — моноклиная сингония; главная спайность по пинакoidу зоны $\{010\}$, добавочная — по другому пинакoidу той же зоны и пинакoidу $\{010\}$. 2. Ограненные со всех сторон зерна с симметричным (или косым) погасанием, дающие в сходящемся свете быстро расходящийся крест. Это может быть ромбическая сингония; главная спайность по пинакoidу, добавочная — по призме, ось которой перпендикулярна к данному пинакoidу. Если же считать погасание косым, возможна моноклиная сингония; главная спайность по пинакoidу $\{010\}$, добавочная — по двум другим пинакoidам.

Спайность, являющаяся главной в выколках первого типа, несомненно, более совершенная, чем та, которая является главной в выколках второго типа.

Немногочисленные зерна с косым погасанием, дающие различные коноскопические фигуры, очевидно представляют собой не совсем правильные выколки одного из этих двух типов.

Измерение показателей преломления при помощи иммерсионного набора с интервалом 0,010 дало: n_p или $n_m \geq 1,630$; $1,640 < n_g < 1,650$. Из этих данных $n_g - n_p$ (или $n_g - n_m$) лежит в пределах 0,007—0,017. Поскольку не исключена возможность, что в справочник данный минерал занесен под несколько иными значениями показателей преломления, примем интервал возможных значений для n_p или n_m 1,620—1,640, для n_g — 1,635—1,655.

Просматриваем по Ларсену двусосные положительные минералы; начиная от $n_m = 1,62$ до $n_p = 1,64$, отбрасывая при этом те, у которых n_p, n_g или $n_g - n_p$ ($n_g - n_m$) явно выходит за установленные нами пределы, а также те, которые не могут быть бесцветными в препарате или обладают аномальной интерференционной окраской. Получаем список из 10 минералов (топаз, целестин, гомилит, пикрофармаколит, клиногумит, автофилиит, паргасит, реблингит, муллит). Учитывая данные о спайности и ориентировке индикатрисы для этих минералов, отбрасываем как неподходящие все из них, кроме целестина и барита¹ (ромбическая сингония, совершенная спайность по $\{001\} \perp$ Т. Б. и $\{110\}$ и несовершенная, не замеченная нами, по $\{010\}$). Показатели преломления обоих этих

¹ В переводе книги Ларсена в данных для обоих этих минералов имеются опечатки. Для барита в графе «спайность» написано $\{100\}$, должно быть $\{110\}$. Для целестина дается значение $n_p = 1,620$, должно быть 1,622.

минералов устойчивы, поэтому останавливаем выбор на барите, так как у целестина n_p (1,622—1,624) меньше, чем у определяемого минерала.

2. Бесцветный минерал. В иммерсионном препарате иногда попадаются зерна с одним прямым ребром или с двумя параллельными ребрами, обладающие прямым погасанием и дающие различные коноскопические фигуры, по которым минерал определяется как дуосный положительный. Большинство зерен имеет совершенно неправильные контуры. Из них около 20—25% имеют низкую интерференционную окраску и дают коноскопическую фигуру с выходом острой биссектрисы в поле зрения. $2E$ примерно равен коноскопическому углу обьектива № 7 (116°).

Из этого заключаем, что минерал обладает не весьма совершенной спайностью $\perp O$. Б. (ромбический; спайность по одному из пинакоидов, или моноклиный; спайность по {010}). Многие зерна, имеющие прямые ребра и дающие различные косые разрезы, повидимому лежат не на грани спайности, а подскалываются плоскостями спайности с боков.

$n_p \leq 1,621$; $n_g \geq 1,624$. Сила двуупреломления порядка 0,003—0,010.

Учитывая возможность колебания показателей преломления, просматриваем по Ларсену дуосные положительные минералы, имеющие n_m в интервале 1,610—1,630 и $n_g - n_p$ в указанных выше пределах, отбрасывая из них бесцветные в препарате. По этим признакам подходят стоксит, топаз, целестин. Из них первый имеет совершенную спайность по призме {110}, а последний по характеру спайности аналогичен бариту (см. предыдущий пример). Остается топаз, для которого указана совершенная спайность по {001} $\perp O$. Б. (Отметим, что эта спайность в нашем случае проявилась не так четко, как обычно проявляется совершенная спайность.)

3. Бесцветный минерал. Большинство зерен в иммерсионном препарате имеет форму коротких брусков с неровными концами. Погасание прямое. Знак удлинения относительно прямых ребер отрицательный. Коноскопическая фигура во всех зернах — крест, быстро расходящийся в сторону неровных концов бруска. Оптический знак отрицательный. Согласно ключу данный минерал либо одноосный, со спайностью по одной или двум призмам, либо ромбический с главной спайностью по пинакоиду $\perp n_m$ или $\perp T$. Б. и с добавочной по другому пинакоиду или призме, ось которой параллельна пинакоиду главной спайности.

Показатели преломления, определенные при помощи малого иммерсионного набора: $n_g = 1,565 \pm 0,005$; $n_p = 1,540 \pm 0,005$, откуда $n_g - n_p = 0,015 - 0,035$.

Поскольку осьность минерала осталась неизвестной, приходится искать его и среди одноосных и среди дуосных отрицательных. Учитывая возможные колебания показателей преломления, берем диапазон значений для $n_g = 1,555 - 1,575$, а для $n_p = 1,530 - 1,550$. Для $n_g - n_p$ принимаем диапазон, указанный выше.

Среди одноосных находим: джефферизит (не подходит по спайности {0001} перпендикулярная к оптической оси), железный брусит (спайности {0001} перпендикулярная к оптической оси); в'ернерит — из группы скаполита (подходит по всем признакам), портландит (спайность перпендикулярная к оптической оси). Среди дуосных: сапонит (знак удлинения +), ашарит (подходит), гидрокалумит (О. Б. почти перпендикулярна спайности), лепидолит (слюда; спайность $\perp O$. Б.), лакруаит (косое погасание), полигалит (косое погасание), полилитониит (слюда).

Таким образом из одноосных подходит скаполит, из дуосных — ашарит — редкий минерал из группы боратов. Резко различный парагенезис этих минералов позволяет без труда сделать выбор между ними. Если исследуемый минерал является скаполитом, то, определив более точно его показатели преломления, можем получить представление о его химическом составе (Ларсен и Берман, стр. 282—283).

Несколько иначе составлен определитель Винчелла (третий том упомянутой выше книги). В нем все оптически-анизотропные мине-

ралы даются в одной таблице, в которой они расположены в порядке возрастания n_o или n_m . Свойства минералов изложены более сжато, чем у Ларсена, что несколько затрудняет выбор при определении. Для каждого минерала указана страница второго тома книги Винчелла, на которой помещено подробное описание данного минерала. В определителе, кроме самих констант, даются пределы возможных колебаний оптических свойств каждого минерала. Чтобы показать эти колебания, автор помещает один и тот же минерал в нескольких местах таблицы, объединяя их черточками со стрелками. Эта система обозначения довольно громоздка и несколько затрудняет пользование определителем.

Винчеллом же сведены в одной книге оптические свойства всех изученных в этом отношении искусственных неорганических химических соединений.¹

Вообще говоря, оптические свойства искусственных химических соединений изучены гораздо менее полно, чем минералов. Поэтому, приступая к оптическому исследованию какой-либо серии химических продуктов, почти всегда приходится предварительно определять оптические свойства известных химических соединений, присутствие которых ожидается в данных продуктах.

¹ А. Н. Винчелл, Оптика и микроскопия искусственных минералов. Пер. под ред. проф. Д. С. Белянкина, Госхимтехиздат, 1933.

УКАЗАТЕЛЬ

- Абсорбция света — 155, 157
 Амплитуда — 7
 Анализатор — 29, 41
 Аномальные интерференционные окраски — 153
 Аншелес О. М. — 4, 140, 215, 220—222
 Барт Т. — 197
 Бекке Ф. — 134, 153
 Белоусова В. Т. — 221
 Белый цвет высших порядков — 83, 84, 96
 Белянкин Д. С. — 259
 Бинормаль — 24
 Бирадиаль — 24
 Биссектрисы острая и тупая (определение) — 57
 Бокий Г. Б. — 225
 Болдырев А. К. — 199
 Брюстер — 172
 Брюстера закон — 27
 Веденева Н. Е. — 191, 194, 196, 204, 230, 235
 Вейншенк — 51
 Винчелл А. Н. — 238, 256, 259
 Вишняков С. Г. — 220
 Волновая поверхность — 10, 16
 Волновая поверхность двусосных кристаллов — 18
 Волновая теория света — 5
 Вращение плоскости поляризации — 169
 Вульф Ю. В. — 182
 Гармоническое колебательное движение — 6
 Герпат — 33
 Гипсовая пластинка — 89, 94
 Главное сечение — 102
 Гониметр — 204
 Грот П. — 172, 199, 205
 Грум-Гржимайло С. — 234
 Гюйгенс — 5, 16
 Дана Г. — 257
 Двойная вариация — 229
 Двойники — 72, 180, 182—184
 Двойное лучепреломление — 15
 Двупреломление (см. сила двупреломления) — 15, 16
 Де-Шон — 140
 Дисперсионный эффект — 163
 Дисперсия асимметричная — 169
 Дисперсия главных осей индикатрисы — 168
 Дисперсия горизонтальная — 169
 » наклонная — 168
 » перекрещенная — 169
 » показателей преломления — 13
 » силы двупреломления — 152
 » угла оптических осей — 164
 » угла оптических осей кажущаяся — 167
 Дихроизм — 157
 Дихроскоп — 160
 Длина волны (определение) — 8
 » световой волны в среде — 9
 Длины волн света — 8, 9, 13
 Доливо-Добровольский В. В. — 199
 Естественный свет — 25
 Жидкость Веста — 192
 Жидкость Сушина-Рорбаха — 193
 Жидкость Туле — 192
 Заварицкий А. Н. — 186, 228
 Знак удлинения (знак главной зоны) — 88, 97, 98
 Избирательное поглощение — 155
 Изогира — 126
 » веерообразная — 134
 » маятниковобразная — 134
 Иммерсионные препараты — 52, 219
 Иммерсионный набор — 189
 Индикатриса — 54
 Интерференционная окраска аномальная — 153
 » аномальная — 154
 » субнормальная — 153
 » супернормальная — 153

- Интерференционные цвета — 81, 84
 Интерференция — 75, 78, 80
 Исландский шпат — 15
- Кварцевый клин — 83, 89
 Кваша Л. Г. — 228
 Компенсатор — 143
 » Берека — 90, 144
 » Никитина — 144
 Компенсаторы — 89, 143
 Компенсация — 88, 90—92
 Конденсор — 41
 Коническая рефракция — 23, 164
 Коноскопическая фигура — 99
 Коноскопический охват — 105
 Круговая поляризация — 26
 Круговое сечение индикатрисы — 56
- Ларсен Е. — 194, 196, 219, 234, 254
 Лебедев А. А. — 228
 Лебедев П. Н. — 5
 Лемникаты — 120
 Ленд — 33
 Линейно-поляризованный свет — 26
 Линза Бертрана — 42, 100
 » Лазо — 41, 100
 Линии спектра (длины волн) — 13
 Лодочников В. Н. — 55, 67, 70, 163, 194, 196
- Максвелл — 5
 Малляр — 121
 Малюс — 30
 Малюса закон — 29
 Машке О. — 214
 Меланхолин Н. — 227, 230
 Мервин — 119, 197
 Метод бегущих полосок (метод Фуке) — 92
 Метод двойной диафрагмы — 215
 » пылинок — 140
 Микроскоп — 36
- Накладная диафрагма — 101
 Накладной анализатор — 142
 Направление (определение) — 60
 » единичное — 60
 Необыкновенные волны (лучи) — 17
 Никитин В. В. — 144, 181, 186
 Николь — 31
 Николь — определение направления колебаний — 159
 Нормаль-к волне — 22
- Общее увеличение — 43
 Объективы — 39
 Объект-микрометр — 43
 Обыкновенные волны (лучи) — 17
 Однородности закон — 60
- Окуляр-микрометр — 40, 44
 Окуляры — 40
 Оптическая ось — 17, 56
 Оптически-активные кристаллы — 171
 Осветитель — 42
 Осветительный аппарат — 41
 Освещение — 49
 Отрицательные (оптически) кристаллы — 17, 57, 59
- Параллельность прямая и обратная — 86, 90, 92, 94
 Период колебания (определение) — 7
 Период световых колебаний — 9
 Перламутровые тона — 83
 Петров В. П. — 146, 224, 235
 Пластинка Меланхолина — 227, 230
 Пластинка «четверть волны» — 89, 96
 Плеохроизм — 156
 Плоская волна — 11
 Плоскость изображения — 38, 99
 » колебаний — 26
 » оптических осей — 56
 » поляризации — 26
- Поверхность волны (см. волновая поверхность)
 Погасание — 35
 Погасание косое — 35; 70—72
 » прямое — 35, 69—72
 » симметричное — 69—72
 Подногин А. К. — 186
- Показатель преломления относительно воздуха — 12
 Показатель преломления относительно данной среды — 12, 13
 Показатель преломления относительно пустоты (абсолютный) — 12
 Полное внутреннее отражение — 14, 198
 Положительные (оптически) кристаллы — 17, 57, 59
 Полоска Бекке — 206
 Поляризатор — 27, 31, 41
 Поляризационный микроскоп — 35
 Поляризация дневного света — 43
 » круговая — 26
 » линейная — 26
 » эллиптическая — 26
 » частичная — 26
- Поляризованный свет — 25
 Поляроид — 32
 Попов Б. А. — 152
 Порошковые препараты — 52
 Правило индикатрисы — 55
 Предельный угол — 14, 198
 Призма Николя — 31
 Принцип Гюйгенса — 10
 Пробные пластинки — 89
 Псевдоабсорбция — 162
 Псевдодихроизм — 161
 Псевдодихроизм — 161

- Разность хода — 75, 77
 Райт Ф. — 126, 142, 210
 Рельеф (положительный и отрицательный) — 162
 Рефрактометр Аббе, Аббе — Пульфриха — 200
 Рефрактометр Аббе, Аббе — Чапского, Клейна — 198
 » Пульфриха — 202
 Рефрактометры — 198
 Свет белый — 9
 Свет монохроматический — 9
 Свет монохроматический (полученные) — 154
 » сложный — 9
 Сетка Вульфа — 182
 Сила двупреломления главная — 138
 » двупреломления данного сечения — 78
 » света — 9
 Скиодромы — 113
 Скорость света в пустоте — 8, 12
 Скращенные николи — 33
 Спайность главная и добавочная — 245
 Статистический метод — 242
 Стеклоплавильная стопа — 27
 Температурный коэффициент — 189—191
 Термическая вариация — 228
 Толщина шлифа — 139
 Трихризм — 158
 Туле — 192
 Турмалин — 32, 159
 Увеличение — 38, 43
 Угол оптических осей — 57
 » » » видимый — 120
 » » » измерение — 121, 126
 Угол падения — 12
 » погасания — 67
 » поляризации — 26
 » преломления — 12
 » просветления — 131
 Удельное вращение — 171
 Усов М. А. — 186
 Фаза колебания — 8
 Федоров Е. С. — 161, 162, 174
 Федоровский столик — 174
 Фильтр дневного света — 43
 Фокусировка — 49
 Френель — 5, 30, 117
 Хроматическая вариация — 229
 Цветная реакция — 217
 Центрировка — 44
 Частично-поляризованный свет — 26
 Частота колебания (определение) — 7
 » световых колебаний — 9
 Шагреневая поверхность — 161
 Шлиф — 52
 Шредер ван-дер-Кольк — 214
 Экспер — 214
 Электромагнитная теория света — 5
 Эллипсоид поглощения — 157
 Эллипсоида закон — 53
 Эллиптическая поляризация — 26
 Эммонс — 185, 186, 228, 230, 232
 Эффект Шредер ван-дер-Колька (когда освещение) — 214
 Юнг — 30

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	Стр. 3
-----------------------	-----------

Часть 1. Общие сведения из кристаллооптики. Исследование кристаллов в поляризованном свете

Введение		
§ 1.	Природа света	5
	2. Поперечное гармоническое колебательное движение	6
	3. Свет как гармоническое колебательное движение	8
	4. Поверхность волны. Принцип Гюйгенса	10
	5. Показатель преломления	11
	6. Частные случаи преломления. Полное внутреннее отражение	14
Глава I. Преломление света в кристаллах		
§ 1.	Явления в исландском шпате	15
	2. Волновые поверхности в кристаллах	16
	3. Преломление света в кристаллах средних сингоний	19
	4. Лучи и нормали	22
	5. Бирадиали и бинормали. Коническая рефракция	23
Глава II. Поляризация света в кристаллах		
§ 1.	Понятие о поляризованном свете	25
	2. Поляризация света при отражении и преломлении. Простейшие поляризаторы	26
	3. Действие поляризатора на поляризованный свет	28
	4. Поляризация света кристаллами	30
	5. Устройство призмы Николя	31
	6. Турмалиновый поляризатор и поляроид	32
	7. Кристалл между скрещенными николями. Погасание	33
Глава III. Поляризационный микроскоп		
§ 1.	Устройство микроскопа	35
	2. Основные характеристики поляризационного микроскопа: общее увеличение; объективы; окуляры; столик микроскопа; осветительный аппарат; поляризационная система; линза Берграна; освещение	38
	3. Определение общего увеличения микроскопа и измерение размеров микроскопических частиц	43
	4. Центрировка микроскопа	44
	5. Приведение микроскопа в рабочее положение и основные проверки: освещение; фокусировка; установка нитей креста на ясное зрение; проверка взаимной перпендикулярности нитей креста; установка николей в скрещенное положение; проверка совпадения нитей креста с направлениями колебаний, пропускаемых николями; определение направления колебаний, пропускаемых поляризатором; проверка правильности вращения столика	49
	6. Микроскопические препараты	52

Глава IV. Оптическая индикатриса

1.	Закон эллипсоида	53
2.	Поляризация и двупреломление света в кристаллах как следствие закона эллипсоида	—
3.	Оптическая индикатриса. Правило индикатрисы	54
4.	Геометрия оптической индикатрисы. Индикатриса — эллипсоид с тремя неравными главными осями; свойства кругового сечения; плоскость оптических осей, угол $2V$, оптический знак кристалла; связь между формой индикатрисы, углом оптических осей и знаком кристалла; индикатриса — эллипсоид вращения; индикатриса — шар	55
5.	Форма и положение оптической индикатрисы в кристаллах разных сингоний. Понятие о равных и единичных направлениях; ориентировка индикатрисы в кристаллах низших сингоний	60

Глава V. Измерение углов под микроскопом. Характер погасания кристаллов разных сингоний. Погасание двойников

1.	Измерение углов между ребрами кристалла	64
2.	Измерение угла спайности	66
3.	Измерение угла погасания	67
4.	Характер погасания кристаллов средних сингоний.	58
5.	Характер погасания кристаллов ромбической сингонии	70
6.	Характер погасания кристаллов моноклинной и триклинной сингоний	72
7.	Погасание двойниковых кристаллов	—

Глава VI. Интерференционная окраска кристаллов

1.	Понятие об интерференции монохроматического света	75
2.	Разность хода в кристаллах	77
3.	Интерференция при параллельных и скрещенных николях	78
4.	Невозможность наблюдения интерференции без поляризатора	80
5.	Интерференция белого света. Шкала интерференционных цветов	—
6.	Интерференционные цвета в параллельных николях	84

Глава VII. Определение наименования осей данного сечения индикатрисы и знака удлинения кристалла

1.	Параллельность прямая и обратная. Разность хода при прямой и обратной параллельности	86
2.	Знак удлинения (знак главной зоны) кристалла	88
3.	Определение знака удлинения кристалла при помощи кварцевого клина методом компенсации. Практические замечания.	90
4.	Метод бегущих полосок. Практические замечания	92
5.	Гипсовая пластинка. Практические замечания	94
6.	Пластинка «четверть волны»	96
7.	Связь между знаком удлинения и оптическим знаком кристалла.	97

Глава VIII. Коноскопия

1.	Принцип метода	99
2.	Получение и наблюдение коноскопических фигур	100
3.	Коноскопия одноосных кристаллов	101
а.	Разрез, перпендикулярный к оптической оси одноосного кристалла	103
б.	Влияние толщины кристалла и силы двупреломления	105
с.	Влияние объектива	—
д.	Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси одноосного кристалла	106

e.	Косой разрез одноосного кристалла	107
f.	Определение знака одноосного кристалла в косом разрезе	109
g.	Разрез параллельно оптической оси одноосного кристалла	112
h.	Определение знака в разрезе, параллельном оптической оси одноосного кристалла	114
§ 4.	Коноскопия двuosных кристаллов	117
a.	Теорема Френеля	—
b.	Разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе	118
c.	Факторы, влияющие на величину расхождения ветвей гиперболы. Истинный и видимый углы оптических осей. Формула Малляра	120
d.	Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе	122
e.	Разрез, перпендикулярный к оптической оси двuosного кристалла	125
f.	Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси	127
g.	Разрез, перпендикулярный к тупой биссектрисе. Определение знака в этом разрезе	128
h.	Сопоставление фигур разрезов, перпендикулярных к острой и тупой биссектрисам	—
i.	Разрез, перпендикулярный к оси n_m (параллельный плоскости оптических осей). Определение знака	130
j.	Сопоставление разрезов параллельного оптической оси одноосного кристалла, \perp Т. Б. и $\perp n_m$	131
k.	Косой разрез двuosного кристалла	132
l.	Определение знака в косом разрезе двuosных кристаллов	134
§ 5.	Определение осности по коноскопическим фигурам	135
§ 6.	Ключ для определения коноскопических фигур	137

Глава IX. Определение силы двупреломления

§ 1.	Общие положения	138
§ 2.	Измерение толщины зерен в шлифе	139
§ 3.	Определение разности хода при помощи кварцевого клина	141
§ 4.	Компенсатор Бабиня	143
§ 5.	Компенсатор Берекя	144
§ 6.	Таблица Мишель-Леви. Приближенное суждение о величине двупреломления	150
§ 7.	Дисперсия силы двупреломления. Аномальные интерференционные цвета	152
§ 8.	Получение монохроматического света. Понятие об определении разности хода в монохроматическом свете	154

Глава X. Плеохроизм

§ 1.	Собственная окраска кристаллов. Плеохроизм	155
§ 2.	Понятие об эллипсоиде поглощения. Плеохроизм в кристаллах разных сингоний	157
§ 3.	Наблюдение плеохроизма кристаллов под микроскопом. Определение направления колебаний в николе. Последовательность операций при исследовании плеохроизма и запись результатов. Влияние толщины кристалла. Дихроскоп	158
§ 4.	Псевдохроизм и псевдодихроизм	161

Глава XI. Сравнение показателей преломления минералов в шлифах

§ 1.	Шагреновая поверхность и рельеф зерен. Псевдоабсорбция	161
§ 2.	Полоска Бекке. Дисперсионный эффект	163

Глава XII. Дисперсия элементов оптической индикатрисы и ее наблюдение		
§ 1. Дисперсия угла оптических осей	164	
§ 2. Дисперсия главных осей индикатрисы	167	
§ 3. Наблюдение дисперсии главных осей индикатрисы в сходящемся свете	168	
Глава XIII. Вращение плоскости поляризации	169	
Глава XIV. Оптические аномалии	172	
Глава XV. Понятие о федоровском (универсальном) методе		
§ 1. Принцип метода	174	
§ 2. Четырехосный федоровский столик	175	
§ 3. Установка и регулировка федоровского столика	176	
§ 4. Монтировка препарата на федоровском столике. Стекло- нные сегменты	178	
§ 5. Определение координат плоскостей спайности, граней и двой- никового шва	179	
§ 6. Нахождение и определение главных осей и плоскостей инди- катрисы	180	
§ 7. Нанесение результатов измерений при помощи сетки Вульфа	182	
§ 8. Поведение одноосного кристалла на федоровском столике. Опре- деление осности. Исследование изотропных разрезов	184	
§ 9. Пятиосный федоровский столик	185	

Часть II. Иммерсионный метод определения вещества

Введение

§ 1. Области применения иммерсионного метода	187
--	-----

Глава XVI. Иммерсионные среды

§ 1. Иммерсионные жидкости	188
§ 2. Высокопреломляющие жидкости	189
§ 3. Водные растворы	192
§ 4. Сплавы для определения высоких показателей преломления	193

Глава XVII. Измерение и проверка показателей преломления иммерсионных жидкостей

§ 1. Общие замечания	197
§ 2. Рефрактометры	198
Рефрактометр с полусферой	—
Рефрактометр с составной призмой	200
Рефрактометр с неподвижной призмой	202
Микрорефрактометры	204
§ 3. Гониометр	—
§ 4. Эталоны для проверки показателей преломления жидкостей	205

Глава XVIII. Полоска Бекке

§ 1. Описание явления	206
§ 2. Причины появления полоски Бекке	207
§ 3. Условия наблюдения полоски Бекке	209
§ 4. Чувствительность метода	210
§ 5. Цветные полоски	—

6.	Посветление и потемнение зерна	212
7.	Видоизменение полоски Бекке для очень малых зерен	213
8.	Видоизменение полоски Бекке в случае очень большой разницы показателей преломления	214

Глава XIX. Эффект косо́го освещения

1.	Получение косо́го освещения	214
2.	Схема эффекта косо́го освещения	215
3.	Условия наблюдения эффекта косо́го освещения	217
4.	Зависимость эффекта косо́го освещения от формы зерна	218
5.	Области применения эффекта косо́го освещения	—

Глава XX. Приготовление иммерсионных препаратов

1.	Общие замечания	219
2.	Приготовление препарата без закрепления зерен	—
3.	Приготовление препарата с закреплением зерен	220
4.	Смена жидкостей в препарате	221
5.	Возможная погрешность при смене жидкости и пути ее устранения	223
6.	Смена жидкости в препарате с незакрепленными зернами	224
7.	Некоторые особенности исследования веществ, растворимых в воде	225

Глава XXI. Измерение высоких показателей преломления при помощи сплавов

1.	Приготовление препаратов	225
2.	Влияние окраски сплавов	226
3.	Точность работы со сплавами	227
4.	Термическая вариация	228
5.	Хроматическая вариация	229
6.	Двойная вариация	—

Глава XXII. Применение иммерсионного метода к петрографическим шлифам

234

Глава XXIII. Определение оптически-изотропных тел в иммерсионных препаратах

235

Глава XXIV. Определение главных показателей преломления оптически-анизотропных кристаллов

236

1.	Определение показателей преломления данного сечения	—
2.	Главные показатели преломления одноосных кристаллов	237
3.	Определение минералов группы кальцита	239
4.	Главные показатели преломления двuosных кристаллов	—
5.	«Обыкновенный» луч в двuosных кристаллах	240
6.	Отличие барита от целестина и определение минералов группы арагонита	242
7.	Статистический метод определения главных показателей преломления, знака и осности кристаллов	—

Глава XXV. Спайность кристаллов в иммерсионных препаратах

§ 1. Введение	244
§ 2. Спайность в одноосных кристаллах	246
§ 3. Спайность в двуосных кристаллах	247
§ 4. Определение осности кристаллов, обладающих хорошей спайностью	249
§ 5. Ключ для определения форм спайности, осности и сигоний в иммерсионных препаратах	251
§ 6. Символы форм спайности в кристаллах разных сигоний	253
§ 7. Переворачивание зерен в препарате для определения осности	254
Глава XXVI. Ход исследования и определение вещества	255
Указатель	260

Ответств. редактор проф. *О. М. Аншлес*

Подписано к печати 22/V-1948 г. М-00920. Печ. л. 16³/₄.
Уч.-авт. л. 19,4. Тираж 3 000. Заказ № 1059.

Отпечатано с матриц в типографии Ленинградского Государственного
ордена Ленина Университета им. А. А. Жданова.

Университетская наб., 7/9.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует
95	8 снизу	00	800
204	14 снизу	р д	сред
237	4 снизу	$n_o < n_r$	$n_o = n_r$
	3 снизу	$n_o > n_r$	$n_o = n_r$

1445